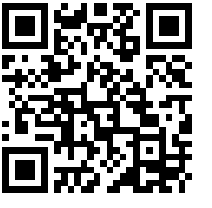
This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

Google™ books

https://books.google.com



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

Die Isolierstoffe der Elektrotechnik

Herausgegeben im Auftrage des
Elektrotechn. Vereins E. V. Berlin

von

H. Schering

Digitized by Google

Library
of the
University of Wisconsin

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Isolierstoffe der Elektrotechnik

Vortragsreihe, veranstaltet von dem Elektrotechnischen Verein E.V. und der Technischen Hochschule, Berlin

Herausgegeben im Auftrage des Elektrotechnischen Vereins E.V.

von

Prof. Dr. H. Schering

Mit 197 Abbildungen im Text

Berlin
Verlag von Julius Springer
1924

Digitized by Google

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1924 by Julius Springer in Berlin.

Digitized by Google

694 5550
291032
AUG 17 1925
TPH
.SCH2

Vorwort.

Die von dem Elektrotechnischen Verein und der Technischen Hochschule zu Berlin im Winter 1920—21 veranstaltete Vortragsreihe über die Isolierstoffe der Elektrotechnik fand eine sehr zahlreiche und interessierte Hörerschaft. Der Umstand, daß es auf diesem Gebiete zwar mannigfache Spezialliteratur, aber keine größere Gesamtdarstellung gibt, bewog den Elektrotechnischen Verein, die Vortragenden zur Niederschrift ihrer Vorträge aufzufordern und diese zu einem Buche zusammengestellt herauszugeben. Es ist natürlich, daß ein so entstandenes Werk nicht den straffen und lückenlosen Aufbau eines Lehrbuches hat, das u. a. Wiederholungen und vereinzelt entgegengesetzte Auffassungen vorkommen. Andererseits dürfte diese individuelle Prägung auch seine Reize für den Leser haben.

Leider ist durch widrige Umstände der Abschluß des Werkes sehr verzögert worden, doch haben Ende 1923 die Mitarbeiter die Beiträge, soweit sie früher abgeschlossen waren, den inzwischen eingetretenen Fortschritten möglichst angepaßt.

Charlottenburg, Januar 1924.

Schering.

Digitized by Google

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Theoretische Grundlagen von Professor Dr. Dr.-Ing. e. h. Karl Willy Wagner, Präsident des Telegraphentechnischen Reichsamts, Berlin-Lankwitz 1

II. Natürliche Isolierstoffe, Marmor, Schiefer, Asbest, Holz von Dr.-Ing. K. Geisler, Regierungsrat und Mitglied des Reichspatentamts, Berlin-Steglitz 60

III. Glimmer und Glimmerprodukte von Dipl.-Ing. Richard Schröder, Mitinhaber von Jaroslaw's Erste Glimmerwaren-Fabrik in Berlin 83

IV. Keramische Isolierstoffe von Dr.-Ing. W. Weicker, Hermsdorf Thür. 109

V. Preßstoffe, plastische Stoffe, Papier und Gespinste, Technologisches aus dem Gebiet der elektrischen Isolierstoffe von Dr. A. Bültemann, Dresden 159

VI. Gummi, Guttapercha und Balata von H. Jaehn, Oberingenieur der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin-Charlottenburg . . 279

VII. Cellon-Lacke als elektrotechnische Isoliermaterialien von Dr. A. Eichengrün, Inhaber der Cellonwerke, Charlottenburg 310

VIII. Das Mineralöl von Professor Dr. F. Frank, Vorstand des Instituts für Braunkohlen-Mineralöl-Forschung an der Technischen Hochschule Charlottenburg 337

IX. Die Prüfung der Isolierstoffe von Professor Dr. H. Schering, Oberregierungsrat und Mitglied der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Charlottenburg 360

Berichtigung.

Auf Seite 11, Zeile 15 von oben muß es heißen:
..... und nennt $d\mathfrak{D}/dt$ statt $d\mathfrak{D}fdt$.

Digitized by Google

I. Theoretische Grundlagen.

Von K. W. Wagner.

Allgemeines.

1. Das ideale Dielektrikum. Das elektrische Verhalten der Isolierstoffe wird in der allgemeinen Theorie der Elektrizität durch zwei Konstanten gekennzeichnet: die Leitfähigkeit λ und die Dielektrizitätskonstante ε.

a) Strömung und Leitfähigkeit. Der Isolierstoff sei einer elektrischen Feldstärke ausgesetzt, die wir mit $\mathfrak{E}$ bezeichnen und in Volt/cm messen wollen. Dann durchfließt den Stoff eine elektrische Strömung, deren Dichte mit i bezeichnet und in Amp/cm² gemessen werden soll. Nach der allgemeinen Theorie ist die Stromdichte überall der gerade herrschenden Feldstärke proportional, was durch die Grundgleichung

$$i = \lambda \mathfrak{E} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

ausgedrückt wird (Ohmsches Gesetz). Der Proportionalitätsfaktor λ heißt die Leitfähigkeit. Nach den vorangehenden Festsetzungen wird die Leitfähigkeit in $\frac{1}{\text{Ohm} \cdot \text{cm}} = (\Omega\,\text{cm})^{-1}$ gemessen.

Zahlentafel 1 enthält die Werte der Leitfähigkeit einer Reihe von Isolierstoffen[1]). Beim Gebrauch dieser Zahlen muß man beachten, daß die Leitfähigkeit eines Isolierstoffs je nach Herkunft und Herstellungsweise der Probe in gewissen Grenzen schwankt. Sehr wenige Isolierstoffe sind so gleichförmig, daß die Maßergebnisse an verschiedenen Probestücken um weniger als 10% voneinander abweichen, während andererseits Werte, die sich um den Faktor 10 unterscheiden, nicht zu den Seltenheiten gehören. Die meisten der angegebenen Zahlen sind Mittelwerte aus Messungen an mehreren Probestücken. Außerdem hängt die Leitfähigkeit in hohem Maße von der Temperatur (siehe unten Nr. 10) und oft auch von der Feuchtigkeit ab (Nr. 11). Die in der Zahlentafel 1 angegebenen Werte wurden bei der Temperatur 20° bis

[1]) Nach Messungen von H. L. Curtis, Bull. of the Bureau of Standards, Washington 1915, Bd. 11, S. 359 (ETZ 1916, S. 469). Werte der Leitfähigkeit von Gesteinen findet man bei H. Löwy, Ann. d. Phys. (4), Bd. 36 (1911), S. 125.

Digitized by Google

22° ermittelt, nachdem die Proben etwa ein halbes Jahr lang (während eines Winters) in dem geheizten Laboratorium in einer verhältnismäßig trockenen Luft gelegen hatten. Die Besonderheiten der Stromleitung in flüssigen Isolierstoffen sind in den Abschnitten Nr. 14 bis 19 erörtert. Mit der Oberflächenleitung beschäftigt sich der Abschnitt Nr. 12.

Zahlentafel 1. Leitfähigkeiten.

Stoff	λ in $(\Omega \cdot \mathrm{cm}^{-1})$ bei 20°	Stoff	λ in $(\Omega \cdot \mathrm{cm})^{-1}$ bei 20°
Ambroid	$2 \cdot 10^{-17}$	farbloser afrik.	$0{,}005 \cdot 10^{-15}$
Bienenwachs, gelb	$5 \cdot 10^{-16}$	rubinroter indischer, stark gefleckt	$20 \cdot 10^{-15}$
„ weiß	$16 \cdot 10^{-16}$	dsgl. leicht gefleckt	$0{,}02 \cdot 10^{-15}$
Zelluloid, weiß	$5 \cdot 10^{-11}$	Mikanit	10^{-15}
Ceresin	unter $2 \cdot 10^{-19}$	Paraffin, rein	unter $0{,}002 \cdot 10^{-16}$
Hartfiber	$0{,}5 \cdot 10^{-10}$	„ technisch	10^{-16}
Roter Fiber	$2 \cdot 10^{-10}$	Porzellan, unglasiert	$3 \cdot 10^{-15}$
Deutsches Glas	$2 \cdot 10^{-14}$	Quarz, geschmolzen	unter $2 \cdot 10^{-19}$
Kavalierglas	$0{,}0125 \cdot 10^{-14}$	Kolophonium	$2 \cdot 10^{-17}$
Opalglas	$100 \cdot 10^{-14}$	Siegellack	$1{,}2 \cdot 10^{-16}$
Plattenglas	$5 \cdot 10^{-14}$	Schellack	10^{-16}
Glyptol[1]	10^{-16}	Schiefer	10^{-8}
Hartgummi	10^{-18}	Schwefel	10^{-17}
Elfenbein	$5 \cdot 10^{-9}$	Tetrachlornaphthalin	$2 \cdot 10^{-14}$
Italien. Marmor	10^{-11}	Holz, paraffiniertes:	
Glimmer:		Mahagoni	$0{,}02 \cdot 10^{-12}$
schwarzgefleckter afrikanischer	$25 \cdot 10^{-15}$	Ahorn	$30 \cdot 10^{-12}$
hellbrauner afrik.	$0{,}5 \cdot 10^{-15}$	Pappel	$2 \cdot 10^{-12}$

b) Verschiebung und Dielektrizitätskonstante. Neben den Strömungsvorgängen bestimmen die Ladungserscheinungen das elektrische Verhalten der Isolierstoffe. Man beschreibt sie mit einer der elektrischen Feldstärke ähnlichen Richtungsgröße, die man die dielektrische Verschiebung nennt. Wir werden sie mit $\mathfrak{D}$ bezeichnen und sie wegen ihres sogleich näher zu erörternden Zusammenhanges mit den Ladungserscheinungen in Coulomb/cm² messen. Nach der allgemeinen Theorie ist die dielektrische Verschiebung der elektrischen Feldstärke proportional:

$$\mathfrak{D} = \frac{\varepsilon}{36\pi \cdot 10^{11}} \mathfrak{E} = \frac{\varepsilon}{\gamma} \mathfrak{E} \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor dieser Grundgleichung, $\frac{\varepsilon}{36\pi \cdot 10^{11}}$, enthält einen durch die gewählten Maßeinheiten bestimmten Faktor $\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{36\pi \cdot 10^{11}} = 0{,}885 \cdot 10^{-13}$ und die den Stoff kennzeichnende Dielektrizitätskonstante ε. Für den leeren Raum und praktisch auch

[1]) Künstliches Harz, hergestellt von der General Electric Co.

Digitized by Google

für Luft ist $\varepsilon = 1$. Die Dielektrizitätskonstante ε gibt also an, um wieviel stärker die dielektrische Verschiebung in einem Körper ist als in Luft, die der gleichen elektrischen Feldstärke ausgesetzt ist.

Die Werte der Dielektrizitätskonstante ε sind in Zahlentafel 2 für eine Reihe von Isolierstoffen angegeben.

Zahlentafel 2. Dielektrizitätskonstanten.

Balata, roh	3,4	Kautschuk (natürlich oder synthetisch)	2,7 bis 2,8
Balata, stark entharzt	3,1	Kolophonium	2,5
Bernstein	2,9	Marmor	8,3
Cellon, hell	3,5	Mikanit	4,5 bis 5,5
Ceresin	2,1 bis 2,2	Olivenöl	3
Ebonit (Hartgummi)	2,5 bis 3,5	Papier	1,8 bis 2,6
Glas, verschieden[1])	5 bis 8	Paraffin (fest)	2,1 bis 2,2
weißes Glas	7,1	Paraffinöl	2 bis 2,5
gewöhnl. Flintglas *O* 118	7,3	Pertinax	4,8
Baryt, Leichtflint *O* 1266	7,7	Petroleum	2,0 bis 2,2
Silikatflint *S* 461	16,5	Porzellan	4,4
Kron mit hoher Dispersion *O* 381	6,8	Quarz (amorph)	3,7
Barytkron *O* 1209	8,3	Quarz (parallel zur Hauptachse)	4,5
Fluorkron *O* 7185	5,9	Rapsöl	2,3
Uviolglas	5,6	Rizinusöl	4,7
Gesteine[2])	7 bis 15	Rüböl	3
Glimmer	5 bis 8	Schellack	2,7 bis 3,7
Guttapercha 45% Harzgehalt	3 bis 3,2	Schwefel	3,6 bis 4,3
Gutta-Gentzsch	2,5	Siegellack	4,3
Starkstromkabel-Isolation (getränktes Papier od. Jute)	4,3	Terpentinöl	2,2
Fernsprechkabel-Isolation (Papier und Luft)	1,6	Transformatorenöl (Mineralöl	2,2
Hartpapier (Repelit)	3,6	Transformatorenöl Harzöl)	2,5
		Wasser	80

c) Verschiebung, Ladung und Ladestrom.

Den Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke, dielektrischer Verschiebung und den elektrischen Ladungen veranschaulicht die Abb. 1. Wirkt in einem Körper $ABCD$ eine elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ (oberes Bild), so besteht in dem Körper eine dielektrische Verschiebung $\mathfrak{D}$, deren Linien mit denen der Feldstärke zusammenfallen (unteres Bild), und deren Stärke durch die obige Gl. (2) gegeben ist. In dem Bilde ist angenommen, daß der Raum außerhalb des Körpers $ABCD$ feldfrei sei. In diesem Falle entspringen alle $\mathfrak{D}$-Linien

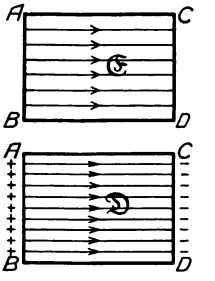


Abb. 1. Zur Erläuterung des Zusammenhanges zwischen der elektrischen Feldsäcke, der dielektrischen Verschiebung und den elektrischen Ladungen.

[1]) R. Jaeger, Dissert. Berlin 1917 (s. a. ETZ 1919, S. 442—443).

[2]) Einzelangaben für 42 Gesteinsarten bei H. Löwy, Ann. d. Phys. (4), Bd. 36 (1911), S. 126—127.

Digitized by Google

auf der Fläche AB, und sie münden sämtlich auf der Fläche CD. Nach der allgemeinen Theorie der Elektrizität sind nun die Anfangs- oder Quellpunkte der Verschiebungslinien identisch mit den positiven Ladungen; die End- oder Mündungspunkte identisch mit den negativen Ladungen. Bei den gewählten Maßeinheiten ist der Zahlenwert des Verschiebungsflusses gleich dem Zahlenwert der Ladung, auf der er entspringt bzw. einmündet. In dem Beispiel der Abb. 1 besitzt also die Endfläche AB eine positive Ladungsdichte vom Betrage $\mathfrak{D}$ Coulomb/cm², und die Endfläche CD eine ebenso große negative Ladungsdichte.

Mit jeder elektrischen Ladung ist ein entsprechender Verschiebungsfluß unlösbar verknüpft.

An irgendeiner Stelle des Raumes kann die Ladung nur dadurch zu- oder abnehmen, daß ein elektrischer Strom dort endigt oder von dort ausgeht. Die Stromstärke ist gleich der Ladungsänderung in der Zeiteinheit:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

Mittels der angegebenen Beziehungen lassen sich alle Fragen beantworten, die das Verhalten idealer Dielektrika im elektrischen Felde betreffen. Dies wollen wir sogleich an zwei charakteristischen Beispielen zeigen. Dabei wird sich ferner ergeben, daß die soeben entwickelten allgemeinen Grundlagen auch ausreichen, die bei den wirklichen Isolierstoffen auftretenden Erscheinungen der Nachladung, des Rückstandes und des dielektrischen Energieverlustes bei Wechselstrom zu erklären und rechnerisch zu beherrschen.

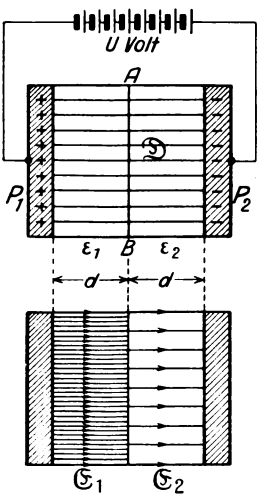


Abb. 2. Zweischichtenkondensator.

Zusammengesetzte Dielektrika. Nachladung und dielektrische Verluste.

2. Körper aus zwei nichtleitenden dielektrischen Schichten. Zwei Platten von gleicher Dicke d aus verschiedenen Isolierstoffen werden aufeinander gelegt und mittels zweier metallischen Elektrodenplatten P_1 und P_2 einer Spannung von U Volt ausgesetzt (Abb. 2). Die Dielektrizitätskonstanten der beiden Stoffe seien verschieden, nämlich ε_1 und ε_2. Die Stromquelle lädt die Platte P_1 positiv, die Platte P_2 negativ. Wir wissen, daß mit diesen Ladungen eine dielektrische Verschiebung $\mathfrak{D}$ verknüpft ist, deren

Digitized by Google

Linien quer durch die Isolierplatten von P_1 nach P_2 verlaufen. Da der Grenzfläche AB keine Ladungen zugeführt worden sind, können keine $\mathfrak{D}$-Linien auf ihr entspringen oder münden, und daraus folgt, daß die Verschiebung $\mathfrak{D}$ in beiden Stoffen gleich stark ist. Hieraus ergibt sich nun weiter, daß die elektrische Feldstärke in den beiden Platten verschieden sein muß, nämlich

$$\mathfrak{E}_1 = \frac{\gamma}{\varepsilon_1}\mathfrak{D} \text{ und } \mathfrak{E}_2 = \frac{\gamma}{\varepsilon_2}\mathfrak{D} \quad \cdots\cdots\cdots (4)$$

Infolgedessen entfallen auf die beiden Platten verschiedene Spannungen; die erste nimmt die Teilspannung $\mathfrak{E}_1 d$, die zweite die Teilspannung $\mathfrak{E}_2 d$ auf. Die Summe beider Teilspannungen ist die Gesamtspannung U:

$$\mathfrak{E}_1 d + \mathfrak{E}_2 d = U.$$

Drückt man hierin $\mathfrak{E}_2$ nach Gl. (4) durch $\mathfrak{E}_1$ aus, so erhält man

$$\mathfrak{E}_1 d \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) = U$$

oder

$$\mathfrak{E}_1 = \frac{U}{d}\cdot\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2} \text{ und } \mathfrak{E}_2 = \frac{U}{d}\cdot\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1+\varepsilon_2} \quad \cdots\cdots (5)$$

Es bestehe z. B. die erste Schicht aus getränktem Papier mit $\varepsilon_1 = 2$, die zweite aus Glimmer mit $\varepsilon_2 = 8$, so wird die Teilspannung

an der ersten Platte $\mathfrak{E}_1 d = 0{,}8\ U$,
an der zweiten Platte $\mathfrak{E}_2 d = 0{,}2\ U$.

Die Papierschicht wird somit viermal stärker beansprucht als die gleichdicke Glimmerschicht, während angesichts der höheren elektrischen Festigkeit des Glimmers das Gegenteil erwünscht wäre. Die betrachtete Anordnung hat demnach von dem Standpunkt der Durchschlagssicherheit als unzweckmäßig zu gelten.

Der untere Teil der Abb. 2 veranschaulicht die elektrische Feldverteilung.

Die Stärke der dielektrischen Verschiebung beträgt

$$\mathfrak{D} = \frac{\varepsilon_1\mathfrak{E}_1}{\gamma} = \frac{\varepsilon_2\mathfrak{E}_2}{\gamma} = \frac{U}{\gamma d}\cdot\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2} = 1{,}6\,\frac{U}{\gamma d}.$$

Z. B. erhält man mit $U = 10000$ Volt, $d = 1$ mm $= 0{,}1$ cm

$$\mathfrak{D} = \frac{1{,}6\cdot 10000}{0{,}1}\cdot 0{,}885\cdot 10^{-13} = 1{,}416\cdot 10^{-8}\,\frac{\text{Coulomb}}{\text{cm}^2}$$

$$\mathfrak{D} = 0{,}01416\,\frac{\text{Mikrocoulomb}}{\text{cm}^2}.$$

Das Verhältnis der Ladung eines Kondensators zu der angelegten Spannung nennt man die Kapazität. Drückt man die Ladung in Mikrocoulomb (μC), die Spannung in Volt (V) aus, so erhält man die Kapazität in Mikrofarad (μF).

Digitized by Google

In unserem Falle beträgt also die Kapazität der Flächeneinheit des Kondensators

$$C = \frac{0{,}01416}{10000} = 1{,}416 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Mikrofarad}}{\text{cm}^2} = 1{,}416 \cdot \frac{\mu\mu\text{F}}{\text{cm}^2}.$$

Die berechnete Feldverteilung bliebe ewig bestehen, wenn die beiden Isolierstoffe völlig nichtleitend wären. Mit dem Einfluß der Leitfähigkeit wollen wir uns im folgenden beschäftigen.

3. Körper aus zwei dielektrischen Schichten beliebiger Leitfähigkeit. Wir legen der Betrachtung wieder die in Abb. 2 veranschaulichte Anordnung zugrunde, schreiben aber nunmehr der ersten Schicht die Leitfähigkeit λ_1, der zweiten Schicht die Leitfähigkeit λ_2 zu. Auch in diesem Falle stellt sich zunächst die vorher berechnete Feldverteilung ein; sie wird aber im allgemeinen nicht dauernd bestehen bleiben, wie die folgende Betrachtung lehrt.

Die Feldstärke $\mathfrak{E}_1$ in der ersten Schicht ruft in dieser eine elektrische Strömung mit der Dichte

$$\mathfrak{i}_1 = \lambda_1 \mathfrak{E}_1 = \frac{U}{d} \frac{\lambda_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (6\text{a})$$

hervor. In der zweiten Schicht beträgt die Stromdichte

$$\mathfrak{i}_2 = \lambda_2 \mathfrak{E}_2 = \frac{U}{d} \frac{\lambda_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (6\text{b})$$

Die Stromdichten $\mathfrak{i}_1$ und $\mathfrak{i}_2$ werden im allgemeinen ungleich sein; d. h. es werden auf der Trennfläche AB der Schichten nicht ebensoviele Stromlinien ankommen als von ihr ausgehen. Hiermit ist aber unweigerlich eine allmähliche Ansammlung elektrischer Ladungen auf der Trennfläche verbunden. Ist z. B. $\lambda_1 \varepsilon_2 > \lambda_2 \varepsilon_1$, so wird $\mathfrak{i}_1 > \mathfrak{i}_2$; es kommt mehr Strom auf AB an als Strom von AB wegfließt, und AB lädt sich infolgedessen positiv. Im umgekehrten Falle erhält AB eine negative Ladung. Nur, falls zufällig $\lambda_1 \varepsilon_2 = \lambda_2 \varepsilon_1$, d. h.

$$\frac{\varepsilon_1}{\lambda_1} = \frac{\varepsilon_2}{\lambda_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7)$$

ist, wird von vornherein $\mathfrak{i}_1 = \mathfrak{i}_2$, und die Trennfläche AB bleibt ungeladen.

Die elektrischen Ladungen, die sich in jedem anderen Falle nach und nach auf AB anhäufen, verändern die ursprüngliche Feldverteilung, bis sich schließlich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Dieser ist offenbar dann erreicht, wenn

$$\mathfrak{i}_1 = \mathfrak{i}_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (8)$$

geworden ist; dann hört nämlich die weitere Anhäufung von Ladungen auf der Zwischenfläche AB auf. Der durch die Gl. (8) bestimmte Endwert der Stromdichte heiße $\mathfrak{i}$; zu ihm gehört

Digitized by Google

in der ersten Schicht die Feldstärke $\mathfrak{E}_1 = \frac{\mathfrak{i}}{\lambda_1}$

in der zweiten Schicht die Feldstärke $\mathfrak{E}_2 = \frac{\mathfrak{i}}{\lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\mathfrak{E}_1$.

Die zugehörigen Teilspannungen sind $\mathfrak{E}_1 d$ und $\mathfrak{E}_2 d$; da jederzeit die Beziehung

$$\mathfrak{E}_1 d + \mathfrak{E}_2 d = U$$

erfüllt sein muß, ergibt sich

$$\mathfrak{E}_1 d \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) = U$$

oder $$\mathfrak{E}_1 = \frac{U}{d} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

und $$\mathfrak{E}_2 = \frac{U}{d} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

Für die vorher beispielsweise betrachteten Stoffe betragen die Leitfähigkeiten etwa

für Papier $\lambda_1 = 10^{-11}\,(\Omega\mathrm{cm})^{-1}$,
für Glimmer $\lambda_2 = 10^{-15}\,(\Omega\mathrm{cm})^{-1}$.

Hieraus ergibt sich die Teilspannung

am Papier: $\mathfrak{E}_1 d = 0{,}0001\,U$,
am Glimmer: $\mathfrak{E}_2 d = 0{,}9999\,U$.

Nunmehr liegt praktisch die gesamte Spannung am Glimmer.

Quer durch beide Schichten fließt Strom von der Dichte

$$\mathfrak{i} = \lambda_1 \mathfrak{E}_1 = \lambda_2 \mathfrak{E}_2 = \frac{U}{d} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}.$$

Mit $U = 10000$ Volt, $d = 0{,}1$ cm erhält man

$$\mathfrak{i} = \frac{10000}{0{,}1} \cdot \frac{10^{-11} \cdot 10^{-15}}{10^{-11} + 10^{-15}} = 10^{-10} \frac{\mathrm{Amp}}{\mathrm{cm}^2}.$$

Die dielektrischen Verschiebungen sind jetzt in den beiden Schichten ungleich; sie betragen

$$\mathfrak{D}_1 = \frac{\varepsilon_1}{\gamma} \mathfrak{E}_1 = \frac{U}{\gamma d} \cdot \frac{\varepsilon_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = 0{,}0002 \cdot \frac{U}{\gamma d}$$

$$\mathfrak{D}_2 = \frac{\varepsilon_2}{\gamma} \mathfrak{E}_2 = \frac{U}{\gamma d} \cdot \frac{\varepsilon_2 \lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} = 8 \frac{U}{\gamma d}.$$

In dem betrachteten Beispiel wird

$$\mathfrak{D}_1 = \frac{10000}{0{,}1} \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-13} \cdot 0{,}0002 = 0{,}000177 \cdot 10^{-8} \frac{\mathrm{Coulomb}}{\mathrm{cm}^2}$$

$$\mathfrak{D}_2 = \frac{10000}{0{,}1} \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-13} \cdot 8 = 7{,}08 \cdot 10^{-8} \frac{\mathrm{Coulomb}}{\mathrm{cm}^2}.$$

Digitized by Google

Die Zahlenwerte von $\mathfrak{D}_1$ und $\mathfrak{D}_2$ ergeben zugleich die Ladungsdichten auf den Elektrodenplatten P_1 und P_2; auf der Trennfläche AB sitzt positive Ladung von der Dichte

$$\mathfrak{D}_2 - \mathfrak{D}_1 \approx 7{,}08 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Coulomb}}{\text{cm}^2}.$$

Wir erhalten also folgendes sehr bemerkenswerte Ergebnis: Im Endzustand ist die an unseren Zweischichtenkondensator abgegebene Ladung fünfmal so groß als im Anfangszustand ($7{,}08 = 5 \cdot 1{,}416$). Während aber die Anfangsladung vollständig auf den beiden Elektroden saß, befinden sich im Endzustande nur die negativen Ladungen vollzählig auf der Elektrode P_2; die positiven Ladungen sitzen so gut wie sämtlich auf der Zwischenfläche AB. Die positiven Ladungen sind allmählich infolge der höheren Leitfähigkeit der ersten Schicht dorthin gewandert.

Der allmählich zunehmenden Ladung unseres Kondensators entspricht eine allmählich wachsende Kapazität. Im Endzustande beträgt sie

$$C = \frac{0{,}0708 \frac{\text{Mikrocoulomb}}{\text{cm}^2}}{10\,000 \text{ Volt}} = 7{,}08 \cdot 10^{-6} \frac{\mu F}{\text{cm}^2} = 7{,}08 \cdot \mu\mu F/\text{cm}^2.$$

Wir beobachten hier die merkwürdige Tatsache, daß die Kapazität verschieden groß ausfällt, je nachdem ob man sie sogleich nach dem Anlegen der Spannung oder nach Ablauf einer gewissen Zeit mißt; die Kapazität wird im Laufe der Zeit immer größer, bis schließlich ein Endwert erreicht wird, der im vorliegenden Falle das fünffache der Anfangskapazität beträgt. Diese eigenartige Erscheinung erklärt sich, wie wir sahen, sehr einfach aus dem Hineinkriechen elektrischer Ladungen in das Dielektrikum.

Nachdem wir nun den Anfangs- und den Endzustand kennen, ist es noch von Interesse, etwas über die Schnelligkeit zu erfahren, mit der der eine Zustand in den anderen übergeht. Hierzu dient die Überlegung, daß die Zwischenfläche AB nur dadurch geladen werden kann, daß ihr Strom zugeführt wird, und zwar erhält die Flächeneinheit den Strom $i_1 - i_2$. Dieser Strom ist nach Gl. (3) gleich der Zunahme der Ladung in der Zeiteinheit. Die Ladung auf der Flächeneinheit beträgt $\mathfrak{D}_2 - \mathfrak{D}_1$. Folglich soll

$$i_1 - i_2 = \frac{d}{dt}(\mathfrak{D}_2 - \mathfrak{D}_1)$$

sein. Hierin drücke man die Stromdichten und die Verschiebungen durch die zugehörigen Feldstärken aus; man erhält alsdann

$$\lambda_1 \mathfrak{E}_1 - \lambda_2 \mathfrak{E}_2 = \frac{\varepsilon_2}{\gamma} \frac{d\mathfrak{E}_2}{dt} - \frac{\varepsilon_1}{\gamma} \frac{d\mathfrak{E}_1}{dt}.$$

Digitized by Google

Ferner ist die Summe der Spannungen an beiden Schichten jederzeit gleich der Gesamtspannung U:

$$\mathfrak{E}_1 d + \mathfrak{E}_2 d = U.$$

Drückt man nun z. B. $\mathfrak{E}_2$ mittels dieser Gleichung durch $\mathfrak{E}_1$ aus und setzt dies in die vorhergehende Gleichung ein, so folgt

$$\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\gamma} \frac{d\mathfrak{E}_1}{dt} + (\lambda_1 + \lambda_2)\,\mathfrak{E}_1 = \lambda_2 \frac{U}{d}.$$

Die Lösung dieser linearen Differentialgleichung erster Ordnung ist

$$\mathfrak{E}_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{U}{d} + \text{Const. } e^{-\frac{t}{T}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

mit

$$T = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\gamma(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

Der erste Teil des Ausdruckes auf der rechten Seite der Gl. (10) ist der Endwert von $\mathfrak{E}_1$ (vgl. Gl. 9); der zweite Teil vermittelt den stetigen Übergang der Feldstärke $\mathfrak{E}_1$ von ihrem durch Gl. (5) gegebenen Anfangswert in diesen Endwert, wobei die in (10) vorkommende Konstante so zu bestimmen ist, das für $t = O$ der genannte Anfangswert herauskommt. Das zweite Glied in Gl. (10) rechts wird in seinem zeitlichen Verlauf durch die Abb. 3 veranschaulicht; die Schnelligkeit, mit der es auf Null hinabsinkt, ist durch die Zeitkonstante T bestimmt. Z. B. ist es für $t = 4\,T$ bis auf 1,8 % seines Anfangswertes abgeklungen.

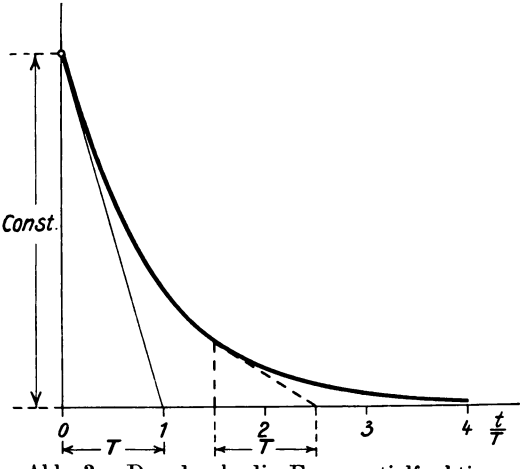


Abb. 3. Der durch die Exponentialfunktion Const. $e^{-\frac{t}{T}}$ dargestellte zeitliche Verlauf.

Auch der Übergang aller übrigen Feldgrößen von ihrem Anfangswert auf den Endwert vollzieht sich nach derselben Exponentialfunktion $e^{-\frac{t}{T}}$.

Im vorliegenden Beispiel beträgt die Zeitkonstante nach Gl. (11)

$$T = \frac{2 + 8}{(10^{-11} + 10^{-15})} \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-13} = 0{,}0885 \text{ Sekunden}.$$

Digitized by Google

Nach $4\,T = 0{,}354$ s ist demnach der Endzustand merklich erreicht.

Hätten wir für die erste Schicht ein sehr sorgfältig getrocknetes und danach mit Paraffin getränktes Papier verwendet und dadurch die Leitfähigkeit auf den Wert $\lambda_1 = 10^{-14}$ herabgesetzt, so würde die Zeitkonstante 88,5 Sekunden betragen und der Endzustand erst etwa 354 s = rd. 6 Minuten nach dem Anlegen der Spannung erreicht werden. Ebensolange Zeit dauert es auch, bis ein derartiger Kondensator entladen ist, nachdem man die ladende Stromquelle entfernt und den Kondensator kurzgeschlossen hat.

Die mit der allmählichen Ansammlung von Ladungen im Innern des Dielektrikums verknüpfte Erscheinung der Nachladung und des Rückstandes ist eine charakteristische Eigenschaft unseres Schichtenkondensators. Obgleich jede der beiden dielektrischen Schichten für sich allein nach der Theorie keine Nachladung zeigen würde, weist die besondere Schichtenanordnung diese Erscheinung auf. Nun bemerkt man allerdings bei fast allen festen Isolierstoffen Nachladung und Rückstand auch dann, wenn man sie für sich allein untersucht. Man hat hierin ein von der klassischen Theorie der Elektrizität abweichendes Verhalten der Isolierstoffe erblicken wollen und deshalb von dielektrischen Anomalien gesprochen. Die vorhergehende Betrachtung, die auf Maxwell[1]) zurückgeht, läßt indessen die Möglichkeit offen, daß auch die Nachladungs- und Rückstandserscheinungen der gewöhnlichen scheinbar homogenen Isolierstoffe nicht auf besonderen von der klassischen Theorie nicht erfaßten Vorgängen beruhen, sondern daß sie vielmehr ähnlich zu erklären sind wie beim Schichtenkondensator. Hierzu braucht man sich nur zu erinnern, daß fast alle Isolierstoffe nur dem flüchtigen Beobachter gleichförmig erscheinen und daß dieser Eindruck einer sorgfältigen Prüfung nicht standhält. Liegt aber die Möglichkeit vor, daß das Verhältnis der Dielektrizitätskonstante zur Leitfähigkeit in einem Isolierstoffe nicht, wie Gl. (7) es für den Schichtenkondensator fordert, überall denselben Wert hat, so würden auch bei beliebiger Verteilung der Inhomogenitäten grundsätzlich dieselben Erscheinungen auftreten müssen, wie im Schichtenkondensator. Das ist, wie die weiter unten angeführten Überlegungen und Beobachtungen lehren, in der Tat der Fall.

4. Das ideale Dielektrikum im Wechselfelde. Die durch die Gleichungen

$$\mathfrak{i} = \lambda \mathfrak{E}, \quad \mathfrak{D} = \frac{\varepsilon}{\gamma} \mathfrak{E}$$

[1]) J. C. Maxwell, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Bd. 1, Art. 328—330; Berlin 1883.

Digitized by Google

ausgedrückten Beziehungen zwischen elektrischer Feldstärke, Strömung und dielektrischer Verschiebung gelten ganz allgemein. Es sei nun

$$\mathfrak{E} = Ee^{i\omega t} \quad (i = \sqrt{-1})$$

ein elektrisches Wechselfeld mit der Amplitude E und der Frequenz $f = \omega/2\pi$. Dann ist i eine Wechselströmung und $\mathfrak{D}$ ebenfalls ein Wechselfeld. Die Ladungen Q, auf denen die Verschiebungslinien entspringen und endigen, sind gleichfalls mit der Frequenz f periodisch veränderlich, und dies bedeutet nach Gl. (3), daß den Flächen, auf denen die Ladungen sitzen, von außen Wechselströme von der Größe $I = dQ/dt$ zufließen müssen. Diese Ladeströme haben für die Flächeneinheit, für welche $Q = \mathfrak{D}$ ist, die Größe

$$I = \frac{d\mathfrak{D}}{dt} = \frac{\varepsilon}{\gamma}\frac{d\mathfrak{E}}{dt} = \frac{i\omega\varepsilon}{\gamma}\mathfrak{E}.$$

Maxwell betrachtet die Größe $d\mathfrak{D}/dt$ im Innern des Dielektrikums als die stetige Fortsetzung des auf den Grenzflächen endigenden Ladestromes und nennt $d\mathfrak{D}/dt$ die „Verschiebungsströmung“[1]). Das einem Wechselfeld ausgesetzte Dielektrikum führt demnach zwei Strömungen:

1. Die soeben genannte Verschiebungsströmung

$$\mathfrak{i}_c = \frac{i\omega\varepsilon}{\gamma}\mathfrak{E} \quad \cdots \quad (12a)$$

und daneben

2. die Leitungsströmung

$$\mathfrak{i}_l = \lambda\mathfrak{E} \quad \cdots\cdots \quad (12b)$$

Die gesamte oder wahre Strömung beträgt somit

$$\mathfrak{i} = \left(\lambda + \frac{i\omega\varepsilon}{\gamma}\right)\mathfrak{E} \quad \cdots \quad (12)$$

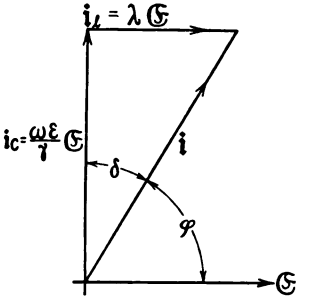


Abb. 4. Wechselstromdiagramm für ein ideales Dielektrikum.

Die Leitungsströmung ist von der Frequenz unabhängig und liegt in Phase mit der Feldstärke; die Verschiebungsströmung wächst mit der Frequenz proportional an und eilt dem Felde in der Phase um 90° voraus (Abb. 4).

Bei allen guten Dielektriken und bei allen gebräuchlichen Frequenzen überwiegt die Verschiebungs- oder Ladekomponente. Nehmen wir zum Beispiel weißes Glas mit $\varepsilon = 7{,}1$ und $\lambda = 2 \cdot 10^{-14}$ bei der Frequenz 50. In diesem Falle ergibt sich der dielektrische Anteil der Leitfähigkeit zu

$$\frac{\omega\varepsilon}{\gamma} = 314 \cdot 7{,}1 \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-13} = 19700 \cdot 10^{-14}.$$

[1]) Diese Definition gilt für beliebig veränderliche Felder, nicht nur für sinusförmige Wechselfelder.

Digitized by Google

Der Leistungsfaktor des Dielektrikums beträgt nach Abb. 4

$$\cos\varphi = \sin\delta \approx \operatorname{tg}\delta = \frac{\lambda}{\omega\varepsilon/\gamma} = \frac{2}{19700} = \text{rd. } 10^{-4},$$

was einem „Verlustwinkel" δ von rd. $^1/_3$ Bogenminute entspricht.

Nun mißt man tatsächlich bei Glas mit 50-periodigem Wechselstrom viel größere Verluste; die Messung liefert einen Leistungsfaktor von rd. $200 \cdot 10^{-4}$, entsprechend einem Verlustwinkel von über einem Grad. Führt man die Messung bei mehreren Frequenzen aus, so findet man außerdem, daß sich der Leistungsfaktor keineswegs im reziproken Verhältnis zur Frequenz verändert, wie es nach dem Vorstehenden zu erwarten sein würde, sondern weit langsamer. Endlich bemerkt man, daß die Dielektrizitätskonstante ε tatsächlich keine Konstante ist, indem sie mit wachsender Frequenz langsam abnimmt. Woher kommen diese Abweichungen? Man hat eine Zeitlang geglaubt, ihre Ursache in einer besonderen, in der klassischen Theorie der Elektrizität nicht vorgesehenen Erscheinung suchen zu sollen, die man dielektrische Hysterese genannt hat und die auf noch unerforschten molekularen Vorgängen beruhen sollte. Wir werden aber im folgenden sehen, daß sie mit den bereits erörterten Nachladungs- und Rückstandserscheinungen eng zusammenhängt und sich aus der inhomogenen Struktur der Isolierstoffe zwanglos erklären läßt.

5. Der Zweischichtenkondensator bei Wechselstrom. Am Beispiel des Zweischichtenkondensators konnten wir die Erscheinungen der Nachladung und des Rückstandes in sehr durchsichtiger Weise auf elementare Vorgänge zurückführen. Wir dürfen daher hoffen, daß auch die auf der Inhomogenität beruhenden Eigentümlichkeiten der Isolierstoffe bei Wechselstrom sich am Zweischichtenkondensator als besonders einfach erweisen werden.

Die folgende Betrachtung knüpft an den vorher erörterten Zusammenhang zwischen dem Verschiebungsstrom in einer dielektrischen Schicht und dem der Schicht zugeführten Ladestrom an. Die Gleichheit dieser beiden Ströme hat zur Folge, daß die gesamte oder wahre Strömung in jeder Schicht denselben Wert hat. Für den Zweischichtenkondensator muß daher gemäß der Gl. (12)

$$\mathfrak{i} = \left(\lambda_1 + \frac{i\omega\varepsilon_1}{\gamma}\right)\mathfrak{E}_1 = \left(\lambda_2 + \frac{i\omega\varepsilon_2}{\gamma}\right)\mathfrak{E}_2 \quad \cdots\cdots \quad (13a)$$

sein.

Die Größen $\lambda + \frac{i\omega\varepsilon}{\gamma}$ spielen bei Wechselstrom dieselbe Rolle wie die Leitfähigkeiten λ bei Gleichstrom. Wir wollen sie die Scheinleit-

Digitized by Google

fähigkeiten für Wechselstrom nennen und sie mit dem Buchstaben $\mathcal{A}$ bezeichnen:

$$\mathcal{A} = \lambda + i\omega \frac{\varepsilon}{\gamma} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (14)$$

Hiermit schreibt sich (13a) kürzer

$$\mathfrak{i} = \mathcal{A}_1 \mathfrak{E}_1 = \mathcal{A}_2 \mathfrak{E}_2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (13b)$$

Bezeichnen wir mit $U = U_0 e^{i\omega t}$ die Spannung am Kondensator, so ist

$$U = \mathfrak{E}_1 d + \mathfrak{E}_2 d.$$

Hieraus folgt, mit (13b):

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{E}_1 &= \frac{U}{d}\,\frac{\mathcal{A}_2}{\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2} \\ \mathfrak{E}_2 &= \frac{U}{d}\,\frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2} \\ \mathfrak{i} &= \frac{U}{d}\,\frac{\mathcal{A}_1 \mathcal{A}_2}{\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (15)$$

Der Wert

$$\mathcal{A} = \frac{\mathcal{A}_1 \mathcal{A}_2}{\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (16)$$

stellt die scheinbare Leitfähigkeit dar, die ein homogener Ersatzstoff haben müßte, damit ein daraus hergestellter Kondensator von den Abmessungen unseres Zweischichtenkondensators die gleichen elektrischen Eigenschaften hätte wie dieser.

Ausführlich geschrieben ist

$$\mathcal{A} = \frac{\left(\lambda_1 + i\omega \frac{\varepsilon_1}{\gamma}\right)\left(\lambda_2 + i\omega \frac{\varepsilon_2}{\gamma}\right)}{\lambda_1 + \lambda_2 + i\omega \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\gamma}} \quad \cdots\cdots \quad (16a)$$

Für Gleichstrom ($\omega = 0$) geht $\mathcal{A}$ in die Gleichstromleitfähigkeit λ über:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (16b)$$

Für sehr hohe Frequenz darf man λ neben $\omega \frac{\varepsilon_1}{\gamma}$ vernachlässigen und erhält

$$\mathcal{A}_\infty = \frac{i\omega}{\gamma}\,\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} = i\omega \frac{\varepsilon}{\gamma}, \quad \cdots\cdots \quad (16c)$$

worin

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (16d)$$

die Dielektrizitätskonstante unseres Ersatzstoffes bei hoher Frequenz bedeutet.

Digitized by Google

Stellt man $\mathcal{A}$ in der Form

$$\mathcal{A} = \lambda + i\omega \frac{\varepsilon}{\gamma} + \mathcal{A}_u \quad \cdots\cdots\cdots \quad (16e)$$

dar, so bedeutet $\mathcal{A}_u$ offenbar den Teil der scheinbaren Leitfähigkeit, der von den Nachladungsvorgängen herrührt. Denn wenn solche Vorgänge nicht einträten, müßte die scheinbare Leitfähigkeit wie bei jedem anderen wirklich homogenen Stoff bereits durch den Ausdruck

$$\lambda + i\omega \frac{\varepsilon}{\gamma}$$

gegeben sein.

Mit Rücksicht auf (16a) bis (16d) ergibt sich aus (16e)

$$\mathcal{A}_u = \frac{\left(\lambda_1 + i\omega \frac{\varepsilon_1}{\gamma}\right)\left(\lambda_2 + i\omega \frac{\varepsilon_2}{\gamma}\right)}{\lambda_1 + \lambda_2 + i\omega \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\gamma}} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} - \frac{i\omega}{\gamma} \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Wir führen nun den bereits in Nr. 3, Gl. (11) benutzten Begriff der Zeitkonstante

$$T = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\gamma(\lambda_1 + \lambda_2)}$$

auch hier ein und bringen die drei Glieder von $\mathcal{A}_u$ auf den Generalnenner $(1 + i\omega T)\gamma(\lambda_1 + \lambda_2)^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$. Man erhält nach einer kleinen und einfachen Rechnung den Wert

$$\mathcal{A}_u = \frac{i\omega(\varepsilon_1 \lambda_2 - \varepsilon_2 \lambda_1)^2}{(1 + i\omega T)\gamma(\lambda_1 + \lambda_2)^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \quad \cdots\cdots \quad (16f)$$

Der Ausdruck lehrt zunächst, daß für den Fall, daß $\varepsilon_1 \lambda_2 = \varepsilon_2 \lambda_1$ ist (vgl. Gl. (7)), unser Zweischichtenkondensator auch bei Wechselstrom keinerlei Besonderheiten gegenüber einem Kondensator mit homogenem Dielektrikum aufweist. Dies war zu erwarten, nachdem wir bereits unter Nr. 3 festgestellt hatten, daß in diesem besonderen Falle Ladungen im Innern des Isolierstoffes, d. h. auf der Trennfläche der beiden Schichten nicht auftreten.

Wir wollen nunmehr $\mathcal{A}_u$ in der Form schreiben

$$\mathcal{A}_u = \frac{i\omega\varepsilon}{\gamma} \cdot \frac{k}{1 + i\omega T} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (16g)$$

Darin bedeutet gemäß Gl. (16f) und (16d) die Größe k den Ausdruck

$$k = \frac{(\varepsilon_1 \lambda_2 - \varepsilon_2 \lambda_1)^2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (\lambda_1 + \lambda_2)^2} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (16h)$$

und gibt einen Maßstab für die Stärke der Nachwirkung in verschiedenen Stoffanordnungen. Wir nennen k die „Nachwirkungskonstante".

Digitized by Google

Für die weiteren Betrachtungen empfiehlt es sich, $\mathcal{A}_n$ auf einen reellen Nenner zu bringen (durch Erweiterung mit $1 - i\omega T$) und alsdann den reellen Teil vom imaginären zu trennen. Auf diese Weise ergibt sich

$$\mathcal{A}_n = \frac{i\omega}{\gamma} \cdot \frac{\varepsilon k}{1 + \omega^2 T^2} + \frac{\omega^2 \varepsilon k T}{\gamma(1 + \omega^2 T^2)} \quad \cdots\cdots (16\,\mathrm{i})$$

Endlich erhält man hiermit aus Gl. (16e) für die scheinbare Leitfähigkeit des Ersatzstoffes den Ausdruck

$$\mathcal{A} = \lambda + \frac{\omega^2 \varepsilon k T}{\gamma(1 + \omega^2 T^2)} + \frac{i\omega}{\gamma} \varepsilon \left(1 + \frac{k}{1 + \omega^2 T^2}\right) \quad \cdots (17)$$

Der reelle Teil

$$\lambda + \frac{\omega^2 \varepsilon k T}{\gamma(1 + \omega^2 T^2)}$$

bestimmt den Energieverbrauch bei Wechselstrom. Dieser ist, wie man sieht, größer, als es der wahren Leitfähigkeit λ entsprechen würde. In dem Mehrverbrauch haben wir die sogenannten „dielektrischen Verluste" zu erblicken.

Der imaginäre Teil von $\mathcal{A}$ bestimmt den Ladestrom. Man sieht, daß die Nachladungsvorgänge die Dielektrizitätskonstante ε scheinbar vergrößern, nämlich auf

$$\varepsilon^* = \varepsilon \left[1 + \frac{k}{1 + \omega^2 T^2}\right] \quad (18)$$

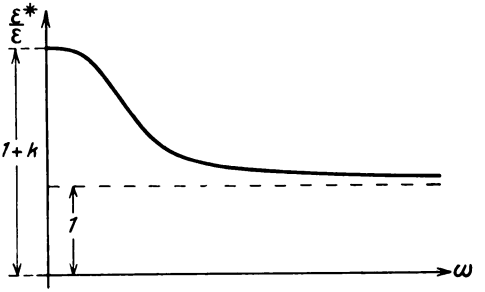


Abb. 5. Abhängigkeit der scheinbaren Dielektrizitätskonstante von der Frequenz infolge der Nachladung (dielektrische Nachwirkung).

ε^* nimmt mit wachsender Frequenz beständig ab, und zwar von dem Gleichstromwert $\varepsilon(1 + k)$ bis auf den Wert ε bei sehr hoher Frequenz, was durch Abb. 5 veranschaulicht wird. Ebenso wie die Dielektrizitätskonstante verhält sich die mit ihr proportionale Kapazität.

Nach Gl. (15) und (16) nimmt unser Zweischichtenkondensator auf der Flächeneinheit einen Strom

$$\mathfrak{i} = \frac{U}{d} \mathcal{A} = \frac{U}{d} \lambda + \frac{U}{d} \frac{\omega^2 \varepsilon k T}{\gamma(1 + \omega^2 T^2)} + i\omega U \frac{\varepsilon^*}{\gamma d}$$

auf. Hiernach ist, bezogen auf die Flächeneinheit, $\frac{\lambda}{d}$ die Gleichstromableitung G_0, ferner

$$\frac{\omega^2 k \varepsilon T}{d\gamma(1 + \omega^2 T^2)}$$

Digitized by Google

die von der Nachladung herrührende zusätzliche Ableitung für Wechselstrom der Kreisfrequenz ω, endlich $\frac{\varepsilon^*}{\gamma d}$ die Kapazität C für Wechselstrom der Kreisfrequenz ω.

Schreiben wir die vorhergehende Gleichung in der Form

$$i = i_0 + i_r + i_c, \quad \cdots \cdots \cdots \cdots \quad (19)$$

wobei die einzelnen Summanden auf der rechten Seite in den beiden Gleichungen einander entsprechen sollen, so bedeutet

i_0 den reinen Leitungsstrom,
i_r den dielektrischen Verluststrom,
i_c den Ladestrom.

Abb. 6 veranschaulicht den durch Gl. (19) gegebenen Zusammenhang durch ein Wechselstromdiagramm. Darin ist die auf der Spannung U senkrechte Stromkomponente OB der Ladestrom i_c mit dem Betrage $\omega U \varepsilon^*/\gamma d$. Der Teil $OA = \omega U \varepsilon/\gamma d$ bedeutet den Ladestrom ohne Nachwirkung; die Vergrößerung des Ladestromes um den Betrag AB rührt her von dem Eindringen von Ladungen in das Innere des Dielektrikums. Da die hierzu gehörigen Ladeströme einen Teil des Isolationswiderstandes überwinden müssen, entsteht eine Wattkomponente des Stromes vom Betrage $i_r = BD$; ihr entspricht der dielektrische Verlust. Endlich tritt als weitere Wattkomponente des Stromes der Leitungsstrom $i_0 = DE = U\lambda/d$ auf; diese Stromkomponente ist, wie nachher an einem Zahlenbeispiel gezeigt werden wird, neben BD verschwindend klein und soll deshalb weiterhin außer Betracht bleiben.

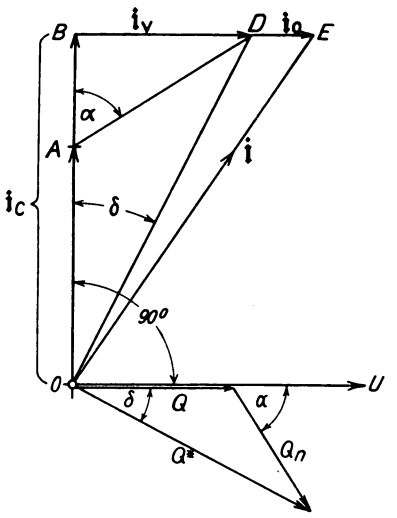


Abb. 6. Wechselstromdiagramm für ein Dielektrikum mit Nachwirkung.

Dem reinen Ladestrom OA entspricht eine mit der Spannung U phasengleiche Ladung $Q = OA/\omega$; dem Nachwirkungsstrom AD die um 90° hinter AD zurückliegende Nachladung $Q_n = AD/\omega$. Hinter der Spannung U bleibt die Nachladung um einen Winkel α zurück; Schuld an dieser Verzögerung ist der hohe Isolationswiderstand.

Der Winkel δ, um den die Gesamtladung Q^* der Spannung nacheilt, heißt der dielektrische Verlustwinkel. Nach dem Diagramm ist der dielektrische Leistungsfaktor des Kondensators

Digitized by Google

$$\cos(90^0 - \delta) = \sin\delta \approx \operatorname{tg}\delta = \left|\frac{i_r}{i_c}\right|,$$

oder
$$\operatorname{tg}\delta = k\,\frac{\varepsilon}{\varepsilon^*}\,\frac{\omega T}{1+\omega^2 T^2} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (20\,a)$$

oder
$$\operatorname{tg}\delta = k\,\frac{\omega T}{1+k+\omega^2 T^2} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (20\,b)$$

Die hierdurch dargestellte Abhängigkeit des Verlustwinkels bzw. Leistungsfaktors von der Frequenz wird durch Abb. 7 veranschaulicht. Er erreicht bei der durch $\omega T = \sqrt{1+k}$ gegebenen Frequenz einen Maximalwert $k/2\cdot\sqrt{1+k}$. Da

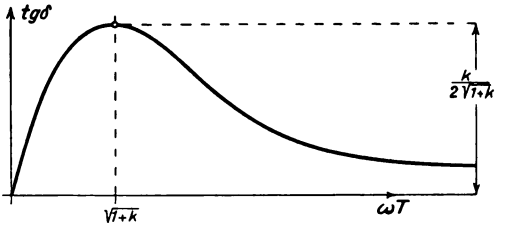


Abb. 7. Dielektrischer Verlust infolge von Nachwirkung in seiner Abhängigkeit von der Frequenz.

$$i_r = GU, \quad |i_c| = \omega C U,$$

so ist auch
$$\operatorname{tg}\delta = \frac{G}{\omega C} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (21)$$

Diese Gleichung vermittelt den Zusammenhang zwischen Verlustwinkel, Ableitung und Kapazität bei Wechselstrom.

Der dielektrische Leistungsverlust beträgt

$$N = U i_r = GU^2 = \omega C U^2 \operatorname{tg}\delta \cdot \cdots\cdots\cdots \quad (22)$$

d.h.: **Der dielektrische Verlust wächst mit dem Quadrat der Spannung.**

6. Zahlenbeispiele. Zur Erläuterung der soeben entwickelten Beziehungen betrachten wir zwei Beispiele.

Beispiel a. Es handle sich um die bereits betrachtete Anordnung mit einer Papierschicht ($\varepsilon_1 = 2$, $\lambda_1 = 10^{-11}$) und einer Glimmerschicht ($\varepsilon_2 = 8$, $\lambda_2 = 10^{-15}$). Man erhält hier die folgenden Werte:
die Gleichstromleitfähigkeit

$$\lambda = \frac{10^{-11}\cdot 10^{-15}}{10^{-11}+10^{-15}} = \text{rd. } 10^{-15},$$

die Dielektrizitätskonstante für hohe Frequenz

$$\varepsilon = \frac{2\cdot 8}{2+8} = 1{,}6,$$

die Zeitkonstante

$$T = \frac{2+8}{10^{-11}+10^{-15}}\cdot 0{,}885\cdot 10^{-13} = 0{,}0885,$$

Digitized by Google

die Nachwirkungskonstante

$$k = \frac{(2 \cdot 10^{-15} - 8 \cdot 10^{-11})^2}{2 \cdot 8\,(10^{-11} + 10^{-15})^2} = 4,$$

die Dielektrizitätskonstante für ganz langsam veränderliche Vorgänge

$$(1 + k)\ \varepsilon = 5 \cdot 1{,}6 = 8.$$

Der größte dielektrische Verlust tritt ein bei der Frequenz

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{1+k}}{2\pi T} = \frac{\sqrt{5}}{6{,}28 \cdot 0{,}0885} = 4{,}02.$$

Der zugehörige Verlustwinkel ergibt sich aus

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{k}{2\sqrt{1+k}} = \frac{4}{2\sqrt{5}} = 0{,}894.$$

Dem entspricht ein Zuwachs der Leitfähigkeit von

$$\frac{\omega^2 \varepsilon k T}{\gamma\,(1 + \omega^2 T^2)} = \frac{(1+k)\,\varepsilon k}{\gamma\,(2+k)\,T} = \frac{5 \cdot 1{,}6 \cdot 4}{6 \cdot 0{,}0885} \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-13} = 5{,}33 \cdot 10^{-12};$$

das ist das 5330fache der Gleichstromleitfähigkeit λ.

Beispiel b. An Stelle der Glimmerschicht befinde sich eine Wasserschicht mit $\varepsilon_2 = 80$, $\lambda_2 = 10^{-4}$. Hiermit ergibt sich:
die Gleichstromleitfähigkeit

$$\lambda = \frac{10^{-11} \cdot 10^{-4}}{10^{-11} + 10^{-4}} = \text{rd. } 10^{-11},$$

die Dielektrizitätskonstante für hohe Frequenz

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 80}{2 + 80} = 1{,}95,$$

die Zeitkonstante

$$T = \frac{2 + 80}{10^{-11} + 10^{-4}} \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-13} = 7{,}25 \cdot 10^{-8},$$

die Nachwirkungskonstante

$$k = \frac{(2 \cdot 10^{-4} - 80 \cdot 10^{-11})^2}{2 \cdot 80\,(10^{-4} + 10^{-11})^2} = 0{,}025,$$

die Dielektrizitätskonstante für ganz langsam veränderliche Vorgänge

$$(1 + k)\,\varepsilon = 1{,}025 \cdot 1{,}95 = 2.$$

Der größte dielektrische Verlust tritt ein bei der Frequenz

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{1+k}}{2\pi T} = \frac{1{,}012}{6{,}28 \cdot 7{,}25 \cdot 10^{-8}} = 2{,}22 \cdot 10^{6}.$$

Digitized by Google

Der zugehörige Verlustwinkel ergibt sich aus

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{k}{2\sqrt{1+k}} = \frac{0{,}025}{2 \cdot 1{,}012} = 0{,}0123.$$

Dem entspricht ein Zuwachs der Leitfähigkeit von

$$\frac{(1+k)\,\varepsilon\,k}{\gamma(2+k)T} = \frac{1{,}025 \cdot 1{,}95 \cdot 0{,}025}{2{,}025 \cdot 7{,}25 \cdot 10^{-8}} \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-13} = 3{,}01 \cdot 10^{-8};$$

das ist das 3010fache der Gleichstromleitfähigkeit λ.

Die beiden Beispiele zeigen deutlich, wie stark der zusätzliche Energieverlust durch Nachwirkung den Verlust durch gewöhnliche Stromleitung überwiegt. In dem ersten Beispiel liegt das Maximum des Verlustwinkels δ bei einer sehr tiefen Frequenz, im zweiten Beispiel bei einer sehr hohen Frequenz. Eine Messung des Leistungsfaktors innerhalb eines begrenzten Bereiches von Gebrauchsfrequenzen (z. B. in dem Starkstromgebiet zwischen 15 und 60 Perioden oder in dem Gebiet der Fernsprechströme zwischen 300 und 2000 Perioden) würde im ersten Beispiel einen mit der Frequenz abnehmenden, im zweiten Beispiel einen mit der Frequenz wachsenden Leistungsfaktor ergeben. An wirklichen Isolierstoffen beobachtet man gewöhnlich entweder den einen oder den anderen Fall. Abb. 8 veranschaulicht die Ergebnisse einer über einen großen Frequenzbereich ausgedehnten Messung des dielektrischen Leistungsfaktors tg δ und der Kapazität einer Drahtisolation, bestehend aus einer Schicht Emaillelack und zwei darüber liegenden Bespinnungen; die erste mit Seide, die zweite mit Baumwolle[1]). In diesem Falle lag das Maximum des Verlustwinkels gerade in dem gemessenen Bereich.

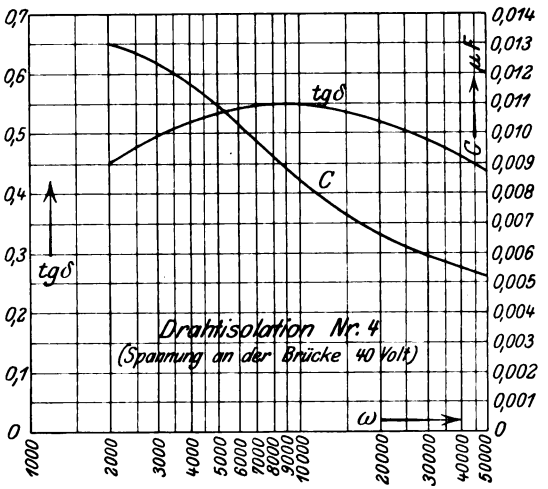


Abb. 8. Frequenzabhängigkeit der Kapazität und des dielektrischen Leistungsfaktors einer Drahtisolation aus Emaillelack, Seide und Baumwolle.

[1]) Die Abbildung ist einer experimentellen Arbeit des Verfassers über die „dielektrischen Eigenschaften von verschiedenen Isolierstoffen" aus dem Archiv f. Elektrot. 1914, Bd. 3, S. 67, entnommen.

Digitized by Google

7. Wirkliche Isolierstoffe. Im Vorhergehenden wurde gezeigt, daß ein aus zwei verschiedenartigen Schichten bestehendes Dielektrikum eine Reihe von besonderen Eigenschaften aufweist (Nachladung, Rückstand, Abnahme der Dielektrizitätskonstante mit wachsender Frequenz, starker zusätzlicher Energieverbrauch bei Wechselstrom), die man auch bei den wirklichen Isolierstoffen beobachtet, die aber ein ideales homogenes Dielektrikum nicht besitzt. Es ist daher zu vermuten, daß jene Eigenschaften der wirklichen Isolierstoffe darauf beruhen, daß diese Stoffe nicht völlig homogen sind. Allerdings sind ihre verschiedenartigen Bestandteile gewöhnlich nicht schichtenartig angeordnet, sondern unregelmäßig durcheinander gemengt. Durch diesen Umstand kann sich jedoch an der unter Nr. 3 geschilderten allmählichen Aufladung der Trennflächen zwischen den verschiedenen Bestandteilen nichts Wesentliches ändern (vgl. Abb. 9). Es fragt sich nur, ob bei unregelmäßiger Anordnung der Bestandteile auch dieselben Gesetze für den zeitlichen Verlauf der Nachladung und für die Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstaute und des Leistungsfaktors von der Frequenz gelten. Man kann zeigen, daß dies in der Tat der Fall ist[1]).

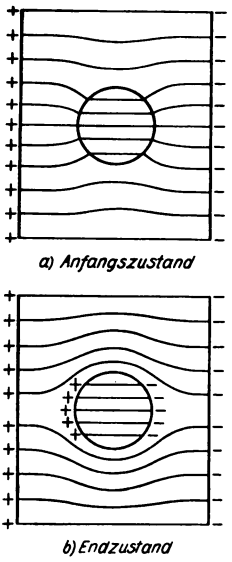


Abb. 9. Einfluß eines Teilchens von abweichender Beschaffenheit auf die Verteilung des elektrischen Feldes.

Es sei z. B. einem homogenen Grundstoff mit der Dielektrizitätskonstante ε_0 und der Leitfähigkeit λ_0 ein zweiter Stoff in einem geringen Mengenverhältnis $p : 1$ (wobei also $p \ll 1$ ist) beigemischt (vgl. Abb. 9). Diese Verunreinigung habe die Dielektrizitätskonstante ε_1 und die Leitfähigkeit λ_1. Dann ergibt die Rechnung, daß für einen solchen Mischkörper dieselben Beziehungen gelten wie für den Zweischichtenkondensator, mit dem Unterschiede, daß für die darin vorkommenden Konstanten die folgenden Werte einzusetzen sind:

Die Gleichstromleitfähigkeit

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 - 3p \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{2\lambda_0 + \lambda_1}\right] \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (23a)$$

die Dielektrizitätskonstante für sehr hohe Frequenz

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[1 - 3p \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{2\varepsilon_0 + \varepsilon_1}\right] \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (23b)$$

---

[1]) Siehe K. W. Wagner, Archiv f. Elektrotechnik 1914, Bd. 2, S. 371.

Digitized by Google

die Zeitkonstante

$$T = \frac{2\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{\gamma(2\lambda_0 + \lambda_1)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (23\,c)$$

die Nachwirkungskonstante

$$k = \frac{9p(\lambda_0\varepsilon_1 - \lambda_1\varepsilon_0)^2}{\varepsilon(2\varepsilon_0 + \varepsilon_1)(2\lambda_0 + \lambda_1)^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (23\,d)$$

Nach der letzten Gleichung verschwindet auch im vorliegenden Falle die Nachwirkung, wenn $\lambda_0\varepsilon_1 = \lambda_1\varepsilon_0$ ist, was aus dem unter Nr. 3 erörterten physikalischen Grunde ohne weiteres einleuchtet.

Wenn man hiernach die bei den wirklichen Isolierstoffen auftretenden Nachwirkungserscheinungen aus der inhomogenen Struktur dieser Stoffe zu erklären vermag, so zeigen sich doch bei näherer Betrachtung noch gewisse Unterschiede im Verhalten vieler wirklicher Isolierstoffe von dem Verhalten des Zweischichtenkondensators, bzw. des aus zwei Bestandteilen gebildeten Mischkörpers. Es liegt nahe, als Grund für diese Unterschiede eine Zusammensetzung der wirklichen Isolierstoffe aus mehr als zwei Bestandteilen anzunehmen.

Besonders übersichtlich gestalten sich die Verhältnisse, wenn man wie vorher einen Grundstoff mit den Konstanten ε_0, λ_0 betrachtet, dem eine Reihe verschiedener Verunreinigungen in geringen Mengen beigemischt sind. Die Konstanten dieser Beimischungen seien mit ε_n, λ_n, ihr Mengenverhältnis zum Grundstoff mit p_n bezeichnet. Dann wirkt jede dieser Beimischungen so, als ob die übrigen nicht vorhanden wären; d. h. ihre Wirkungen lagern sich ungestört übereinander. Jeder einzelnen Beimischung entspricht ein gewisser Anteil an der Nachladung, der nach dem Exponentialgesetz $e^{-\frac{t}{T_n}}$ entsteht oder verschwindet. Die einzelnen Zeitkonstanten

$$T_n = \frac{2\varepsilon_0 + \varepsilon_n}{\gamma(2\lambda_0 + \lambda_n)}$$

werden im allgemeinen verschieden groß sein; daher werden einige Anteile der Nachladung schnell, andere langsamer ablaufen. Die gesamte Nachladung ändert sich also nicht mehr nach einem einfachen Exponentialgesetze, sondern zieht sich mehr in die Länge.

Ferner: Jede einzelne Beimischung wird zum Leistungsfaktor einen Beitrag liefern, dessen Frequenzabhängigkeit durch die Kurve nach Abb. 7 dargestellt wird. Im allgemeinen werden aber die einzelnen Beiträge bei verschiedenen Frequenzwerten ihr Maximum erreichen, so daß die Kurve des gesamten Leistungsfaktors stark verbreitert erscheint, wenn sie nicht gar mehrere Maxima aufweist.

Aus demselben Grunde kann endlich auch die Kurve, welche die

Digitized by Google

Abnahme der scheinbaren Dielektrizitätskonstante des Mischkörpers mit steigender Frequenz darstellt, von der für den einfachsten Fall geltenden Form nach Abb. 5 abweichen.

Bei vielen Isolierstoffen erhält man eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten Werte mit dem beobachteten zeitlichen Verlauf der Nachwirkungserscheinungen und mit der beobachteten Abhängigkeit der Größen $\operatorname{tg}\delta$ und ε, bzw. C von der Frequenz unter der Annahme, daß die Leitfähigkeiten der verschiedenen Verunreinigungen sich nach einem Wahrscheinlichkeitsgesetz um einen mittleren Wert verteilen. Die Durchführung der diesbezüglichen Berechnungen und ihr Vergleich mit den Messungsergebnissen würde hier zu weit führen; wir begnügen uns daher mit dem Hinweis auf die Literatur[1]).

So vielgestaltig sich die Verhältnisse nach dem soeben ausgeführten im einzelnen auch zeigen können, so ist doch durch die zugrunde gelegte physikalische Vorstellung ein Rahmen gegeben, innerhalb dessen sich alles abspielen muß, wenn diese Vorstellung richtig ist. Beispielsweise kann nach der vorgetragenen Auffassung die Dielektrizitätskonstante niemals mit steigender Frequenz wachsen, sondern muß unbedingt abnehmen, was man bisher auch stets beobachtet hat.

Eine starke Stütze findet die hier gegebene Erklärungsweise in folgenden Tatsachen.

a) Die Nachwirkungserscheinungen treten um so mehr zurück, je reiner und gleichförmiger die untersuchten Stoffe sind. Vor längerer Zeit hat bereits L. Arons festgestellt[2]) daß Kondensatoren, deren Dielektrikum aus reinem Paraffin mit aller Sorgfalt hergestellt ist, keinen merklichen Rückstand zeigen. In Einklang damit ergaben die Messungen des Verfassers[3]) mit Wechselströmen verschiedener Frequenz für Paraffin und das ihm ähnliche Ceresin äußerst kleine dielektrische Verlustwinkel, die bereits an der Grenze des Meßbaren liegen; so bei der Frequenz 500 Per/s und der Temperatur 20° für Paraffin $\operatorname{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ und für Ceresin sogar nur $2 \cdot 10^{-5}$, entsprechend Winkeln von rd 10 bzw. 4 Bogensekunden! Ein Gemisch aus 50% Paraffin und 50% Ceresin wies dagegen unter denselben Verhältnissen einen Leistungsfaktor $\operatorname{tg}\delta = 13 \cdot 10^{-5}$ auf. Die dielektrischen Verluste des Gemischs sind also größer als diejenigen jedes der beiden Bestandteile, was nach unserer Auffassung von der Herkunft der Nachwirkungserscheinungen ohne weiteres verständlich ist.

[1]) K. W. Wagner, Ann. d. Phys. (4), Bd. 40, 1913, S. 817; ETZ 1913, S. 1279; Archiv f. Elektrot. Bd. 2, 1914, S. 371; Bd. 3, S. 67. — F. Tank, Ann. d. Phys. (4), Bd. 48, 1915.

[2]) L. Arons, Ann. d. Phys. (3), Bd. 35, 1888, S. 291.

[3]) Archiv f. Elektrot., Bd. 3, 1914, S. 99.

Digitized by Google

Andere gleichförmige Stoffe mit sehr geringer Nachwirkung sind z. B. Quarz und Schwefel.

Wenn wir umgekehrt bei vielen Glassorten eine starke dielektrische Nachwirkung finden, so müssen wir schließen, daß ihre Gleichförmigkeit nur eine scheinbare ist. Daß dem in der Tat so ist, läßt sich oft schon durch eine einfache optische Untersuchung nachweisen.

b) Dünnflüssige Isolierstoffe zeigen keine nennenswerte Nachwirkung. Seit langem ist bekannt, daß man keine Rückstandsladungen aus Kondensatoren mit flüssigem Dielektrikum (z. B. Öl, Petroleum oder dergl.) erhält[1]).

Durch die Messungen von L. Pungs[2]) ist ferner erwiesen, daß der Energieverlust in Flüssigkeiten bei Wechselstrom auf reine Stromleitung zurückzuführen und infolgedessen von der Frequenz unabhängig ist[3]). Der Leistungsfaktor $\operatorname{tg}\delta = \frac{i_v}{i_c}$ nimmt umgekehrt proportional zur Frequenz ab, weil der Leitungsstrom i_v von der Frequenz unabhängig ist, während der Ladestrom i_c proportional mit der Frequenz wächst.

Beim Schmelzen eines mit Nachwirkung behafteten festen Dielektrikums verschwindet die Nachwirkung.

Alles dies erklärt sich nach unserer Auffassung zwanglos aus dem Umstande, daß Inhomogenitäten in einer nicht allzu zähen Flüssigkeit nicht lange bestehen bleiben, sondern sich durch Auflösung und Durchmischung infolge von Diffusion und Konvektionsströmungen sehr bald ausgleichen. Die Flüssigkeit wird daher in der Regel das Bild eines gleichförmigen Stoffes bieten.

c) Durch die von einem festen Isolierstoff aufgesogene Feuchtigkeit wird die Nachwirkung und insbesondere der schnell veränderliche Teil der Nachwirkung beträchtlich erhöht. Das ist nach den Darlegungen unter Nr. 3 erklärlich, wenn man beachtet, daß das Verhältnis ε/λ beim Wasser wegen seiner großen Leitfähigkeit sehr viel kleiner ist als bei den Isolierstoffen, denen es beigemischt ist. Die Verschiedenheit der Werte ε/λ verursacht die Nachwirkung, und die hohe Leitfähigkeit des Wassers verleiht nach Gl. (11) der Zeitkonstante T einen kleinen Wert und bewirkt somit ein schnelles Abklingen der Nachwirkungserscheinungen. Damit hängt weiter zusammen, daß das Maximum des Verlustwinkels erst bei hohen Frequenzen eintritt. (Vergl. das Beispiel b unter Nr. 6).

Ein Isolierstoff, der Feuchtigkeit enthält, ist z. B. Papier. Durch

---

[1]) Vgl. E. v. Schweidler, Ann. d. Phys. (4), Bd. 24, S. 711.

[2]) Archiv f. Elektrot., Bd. 1, 1912, S. 329.

[3]) Näheres über die Stromleitung in flüssigen Isolierstoffen ist in den Abschnitten Nr. 14 bis 19 ausgeführt.

Digitized by Google

scharfes Trocknen kann man einen erheblichen Teil der Feuchtigkeit entfernen und dadurch die dielektrischen Verluste stark herabsetzen. Ganz beseitigen läßt sich der Wassergehalt aber nicht; daher zeigt auch gut getrocknetes Papier in dielektrischer Beziehung die Eigenschaften eines wasserhaltigen Isolierstoffes. Damit hängt zusammen, daß der Verlustwinkel bis zu hohen Frequenzen hinauf mit der Frequenz zunimmt. Als Beispiel hierfür mag Abb. 10 gelten; sie zeigt die Messungsergebnisse an einem Fernsprechkabel, dessen Isolierschicht aus gut getrocknetem Papier besteht, das lose um den Leiter gewickelt ist[1]).

d) Die Nachwirkungserscheinungen werden durch Veränderungen der Temperatur stark beeinflußt und zwar in einer ganz charakte-

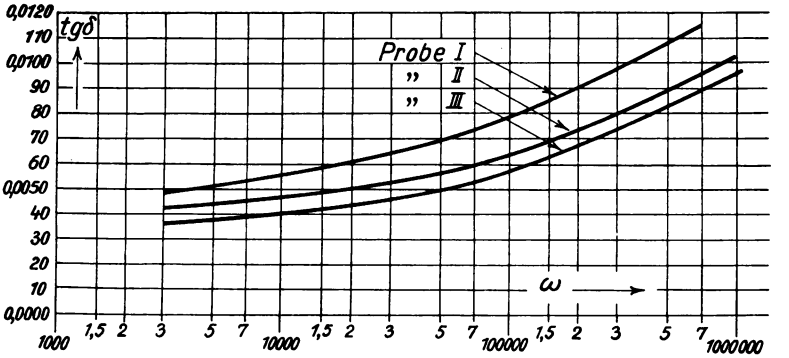


Abb. 10. Dielektrischer Leistungsfaktor von Kabelisolation aus sorgsam getrocknetem Papier (Fernsprechkabel) in einem weiten Frequenzbereich.

ristischen Weise. Die vorher entwickelten physikalischen Vorstellungen geben auch hierfür eine einfache Erklärung, wie im folgenden gezeigt werden soll.

8. Einfluß der Temperatur. Dieser ist hauptsächlich dadurch bestimmt, daß die Leitfähigkeit λ mit steigender Temperatur sehr stark zunimmt. (Vergl. Nr. 10b.) Dagegen ist die Dielektrizitätskonstante ε nur in geringem Maße von der Temperatur abhängig. Infolgedessen muß die Zeitkonstante (Gl. 11; 23c) mit wachsender Temperatur stark abnehmen.

Dagegen wird die Nachwirkungskonstante k (Gl. 16h, bzw. 23d) sich meist nur wenig mit der Temperatur ändern. Denn im allge-

[1]) Über den Einfluß der Feuchtigkeit auf die dielektrischen Verluste siehe ferner U. Meyer, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1917, S. 139, sowie die Druckschrift des Telegraphenversuchsamts „Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von künstlichen Isolierstoffen" (Julius Springer).

Digitized by Google

meinen ist einer der Werte λ_1 oder λ_2 viel größer als der andere, so daß der die Leitfähigkeiten enthaltende Teil von k tatsächlich von den λ unabhängig wird. Beispielsweise reduziert sich in der Gl. 16h der Ausdruck $(\varepsilon_1\lambda_2 - \varepsilon_2\lambda_1)^2/(\lambda_1 + \lambda_2)^2$ bei überwiegendem λ_1 auf ε_2^2, im anderen Falle auf ε_1^2, also jedenfalls auf eine von der Temperatur nur schwach abhängige Größe.

Die Zeitkonstante bestimmt den zeitlichen Ablauf der Nachladung und im wesentlichen auch die Abhängigkeit des Leistungsfaktors tgδ von der Frequenz; die Nachwirkungskonstante bestimmt die Stärke der Nachladung und den Höchstwert des Leistungsfaktors. Wir haben somit hinsichtlich des Temperatureinflusses auf die dielektrischen Nachwirkungsvorgänge folgendes zu erwarten.

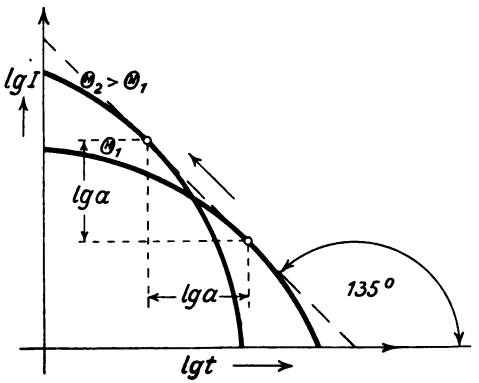


Abb. 11. Einfluß der Temperatur auf den zeitlichen Verlauf des Nachladestromes (Temperaturgesetz der korrespondierenden Zustände).

a) Nachladung. Bei einer Steigerung der Temperatur behält die Nachladung ihre Stärke, nimmt aber einen rascheren zeitlichen Verlauf. Da der Nachladungsstrom gleich der Änderung der Nachladung in der Zeiteinheit ist, so muß sich der Nachladungsstrom in demselben Maße verstärken, wie er rascher verläuft. Z. B. befolgt im einfachsten Falle, nämlich in dem aus nur zwei Bestandteilen gebildeten Mischkörper der Nachladungsstrom das Exponentialgesetz[1])

$$I = Ae^{-\frac{t}{T}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (24a)$$

A bedeutet den Anfangswert des Nachladungsstromes. Wird durch eine Temperatursteigerung die Leitfähigkeit im Verhältnis $1 : a$ erhöht, so verläuft nach dem soeben Ausgeführten der Nachladungsstrom bei der höheren Temperatur nach dem Gesetze

$$I = aAe^{-\frac{at}{T}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (24b)$$

Trägt man nun für verschiedene Temperaturen Θ den Strom I als Funktion von t in einem logarithmisch geteilten Koordinatennetz auf,

[1]) Dies ergibt sich aus den Darlegungen im letzten Teile von Nr. 3.

Digitized by Google

so erhält man nach (24a) und (24b) lauter Kurven von derselben Gestalt, die durch Parallelverschiebung ineinander übergehen (Abb. 11).

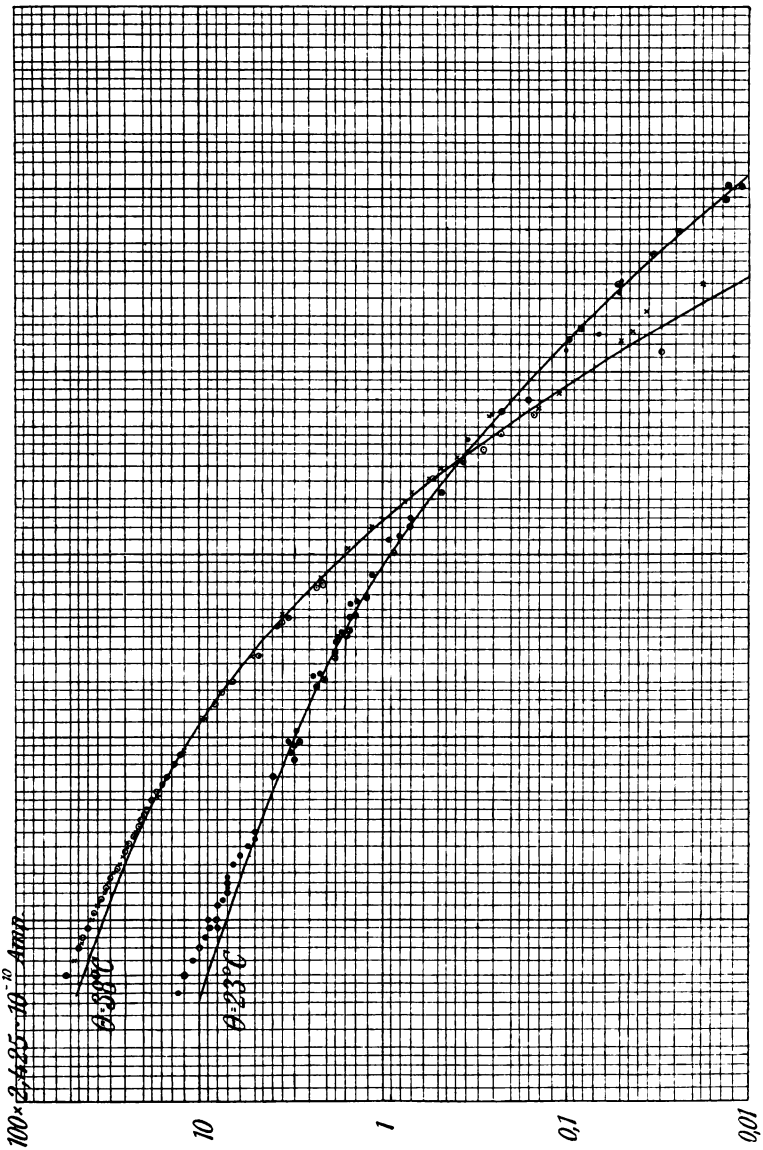


Abb. 12. Zeitlicher Verlauf der Nachladung eines Papier-Kolophoniumkondensators.

Bei zunehmender Temperatur Θ muß die Verschiebung in Richtung wachsender I und abnehmender t, und zwar um den gleichen Betrag $lg\,a$ vorgenommen werden, und sie kann daher auch unmittelbar um

Digitized by Google

die Größe $\sqrt{2}\, lg\, a$ längs einer Geraden erfolgen, die mit der positiven Zeitachse den Winkel von 135° einschließt.

Diese Überlegung gilt auch noch für Mischkörper aus mehreren Bestandteilen, wenn die Temperatur alle Leitfähigkeiten in demselben Verhältnis beeinflußt. In dem Bereiche der praktisch interessierenden Gebrauchstemperaturen trifft diese Voraussetzung für viele Stoffe ziem-

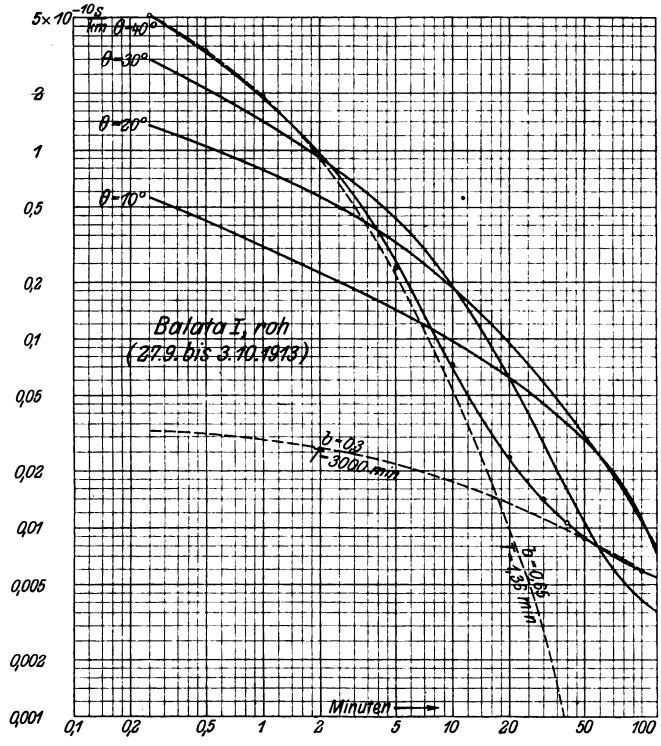


Abb. 13. Zeitlicher Verlauf der Nachladung eines mit Balata isolierten Seekabels.

lich gut zu. So erklärt es sich, daß der durch die Abb. 11 veranschaulichte Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf des Nachladungsstromes und der Temperatur bei sehr vielen Isolierstoffen die tatsächlich beobachteten Verhältnisse recht gut wiedergibt. Beispiele hierfür zeigen die Abb. 12 und 13.

Abb. 12[1]) bezieht sich auf einen Papierkondensator, dessen Papier nach scharfer Trocknung im Vakuum mit Kolophonium getränkt

[1]) Aus den Ann. d. Phys. (4), Bd. 40, S. 845.

Digitized by Google

worden war. Die eingezeichneten Marken entsprechen den beobachteten Werten; die Kreise gelten für die Ladung, die Kreuze und Kreiskreuze gelten für die Entladung. Die ausgezogenen Linienzüge sind berechnet unter der Annahme: die Nachwirkung rührt von einer Beimischung her, die in ihren einzelnen Teilchen verschiedene Leitfähigkeit besitzt, wobei indessen diese Leitfähigkeiten sich nach einem Wahrscheinlichkeitsgesetz um einen mittleren Wert verteilen (vgl. Nr. 7). Diese Verteilung ändert sich ein wenig mit der Temperatur, weshalb die beiden Kurven (für 23° und 38° C) sich durch Parallelverschiebung nicht völlig zur Deckung bringen lassen.

In Abb. 13 sind Messungen an einem mit roher Balata isolierten Probestück Seekabel wiedergegeben[1]). Die einzelnen Kurven haben einen komplizierten Verlauf, der sich mit der Annahme erklären läßt, daß es sich um einen Mischkörper aus einem Grundstoff mit zwei verschiedenartigen Beimengungen handelt. Für die 40°-Kurve ist diese Annahme rechnerisch durchgeführt worden. Die beiden punktierten Kurven sind die von den Beimengungen einzeln hervorgebrachten Nachladeströme[2]). Für eine Reihe von Zeitpunkten ist die Summe dieser Teilströme gebildet; die Summenwerte sind in Abb. 13 als kleine Kreise eingetragen, und man sieht, daß sie mit dem beobachteten Linienzug überall zusammenfallen. Man sieht ferner deutlich, daß die für die verschiedenen Temperaturen erhaltenen Kurven durch eine einfache Parallelverschiebung im Sinne der Abb. 11 ineinander übergeführt werden können.

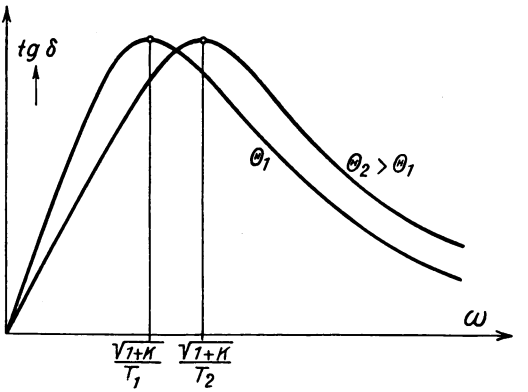


Abb. 14. Einfluß der Temperatur auf die Frequenzkurven des dielektrischen Leistungsfaktors (Temperaturgesetz der korrespondierenden Zustände).

b) Dielektrischer Verlust. Hinsichtlich des dielektrischen Leistungsfaktors $\operatorname{tg}\delta$ drückt Abb. 14 das „Temperaturgesetz der korrespondierenden Zustände“ aus. Nach dem am Anfang des Abschnitts Ausgeführten ist die Nachwirkungskonstante k von der

[1]) Aus dem Archiv f. Elektrot., Bd. 3, S. 83.

[2]) Die Ströme sind hier auf ein Volt Spannung und 1 km Kabellänge umgerechnet, so daß die Stromwerte gleich den in Siemens/km ausgedrückten Ableitungswerten sind; diese sind als Ordinaten angegeben.

Digitized by Google

Temperatur so gut wie unabhängig; diese beeinflußt nur die Zeitkonstante T, in dem Sinne, daß T mit wachsender Temperatur abnimmt. Da Zeitkonstante und Frequenz in dem Ausdruck des dielektrischen Leistungsfaktors (Gl. 20b) nur in der Verbindung ωT eingehen, bedeutet eine Veränderung der Zeitkonstante T nur eine Dehnung oder Verkürzung der $\operatorname{tg}\delta$-Kurve in Richtung der ω-Achse. Mit steigender Temperatur Θ nimmt T ab und die $\operatorname{tg}\delta$-Kurve erscheint auseinandergezogen, wie es die Abb. 14 zeigt. Hat man in dieser Weise eine Schar von Verlustwinkelkurven für eine Reihe von Temperaturwerten ermittelt, so kann man hieraus eine zweite Kurvenschar ableiten, die die Abhängigkeit des $\operatorname{tg}\delta$ von der Temperatur bei konstant gehaltener Frequenz zeigt (Abb. 15). Diese Kurvenschar läßt sich leichter experimentell aufnehmen als die vorhergehende. Hierzu müßte man die Frequenz in einem weiten Bereiche verändern (im allgemeinen mindestens im Verhältnis 1 : 100 bis 1 : 10000). Dagegen hat die Temperatur einen so großen Einfluß auf die Zeitkonstante, daß eine Temperaturänderung um etwa 50° einer Frequenzänderung um mehrere Zehnerpotenzen gleichwertig ist und daher einen hinreichenden Einblick in den Verlauf der Nachwirkungserscheinung gewährt. Abb. 16a zeigt einige Verlustwinkelkurven für Bienenwachs, die das soeben Ausgeführte bestätigen[1]). Nicht immer liegt das Maximum von $\operatorname{tg}\delta$ für mittlere Frequenzen innerhalb des

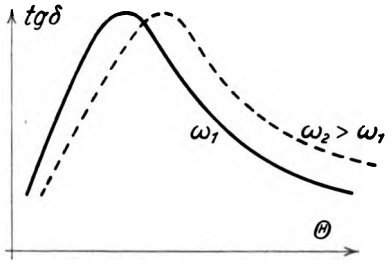


Abb. 15. Abhängigkeit des dielektrischen Leistungsfaktors von der Temperatur für verschiedene Frequenzen (theoretischer Verlauf).

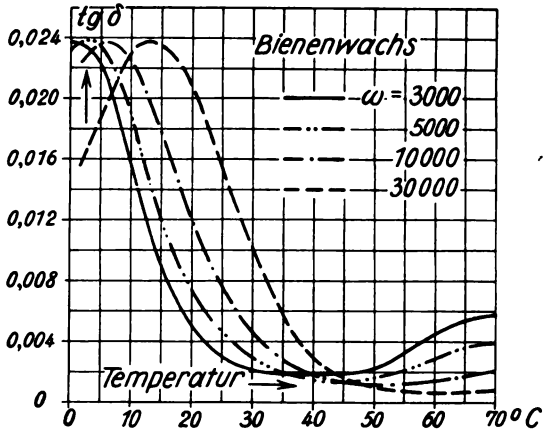


Abb. 16a. Dielektrischer Leistungsfaktor von Bienenwachs.

[1]) Die Temperaturen oberhalb des Minimums von $\operatorname{tg}\delta$ müssen außer Betracht bleiben, weil hier das Wachs schmilzt.

Digitized by Google

Bereichs der Gebrauchstemperaturen. Messungen des Verlustwinkels einiger Stoffe über einen großen Temperaturbereich haben Fleming und Dyke ausgeführt; in Abb. 16b und 16c sind die von ihnen für

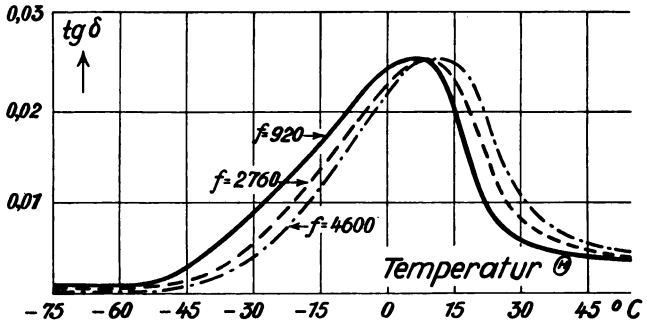


Abb. 16b. Dielektrischer Leistungsfaktor von Guttapercha.

Guttapercha und Kautschuk bei den Frequenzen 920, 2760 und 4600 Per/s erhaltenen Werte dargestellt[1]). In jedem Falle bewahrheiten die Messungen die folgende Regel, die sich aus den Abb. 15 bis 16c ohne weiteres ablesen läßt:

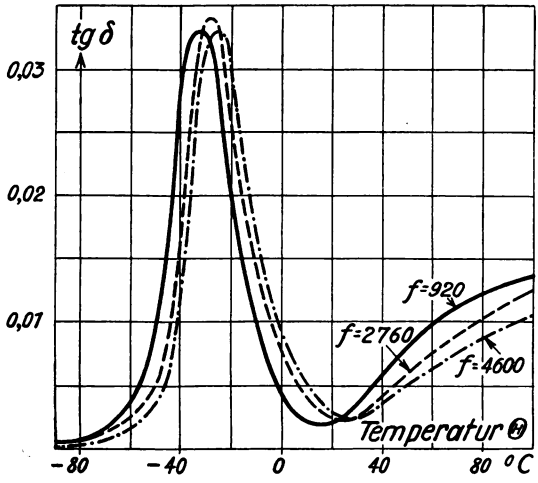


Abb. 16c. Dielektrischer Leistungsfaktor von Kautschuk.

In einem Temperaturgebiet, in welchem tgδ mit steigender Temperatur abnimmt (bzw. zunimmt) wächst (bzw. sinkt) tgδ mit steigender Frequenz.

Die starke Abhängigkeit der dielektrischen Verluste von der Temperatur erfordert, daß man bei der Messung dieser Verluste die Temperatur konstant hält und sie bei der Angabe des Messungsergebnisses ebenfalls angibt.

Die Außerachtlassung dieses Umstandes hat zu mancherlei Irrtümern geführt. Der dielektrische Leistungsfaktor einer Reihe von Isolier-

[1]) Siehe die Literaturübersicht im Abschnitt Nr. 9.

Digitized by Google

stoffen verläuft ähnlich wie beim Bienenwachs. Macht man nun die Messung bei etwa 20° mit hoher Spannung, so werden die mit der Spannung quadratisch wachsenden Verluste[1]) das Dielektrikum mehr und mehr erwärmen. Infolgedessen nehmen die Verluste bei gleichbleibender Spannung allmählich ab. Jemand der auf die Temperaturänderung nicht achtet, gewinnt den Eindruck, als ob das Dielektrikum durch die Einwirkung der Spannung allmählich verbessert würde.

9. **Die Zahlenwerte des dielektrischen Leistungsfaktors** einer Reihe von Isolierstoffen sind für einige Frequenzen in der Zahlentafel 3 angegeben. Wegen der langsamen Änderung des Verlustwinkels mit der Frequenz gelten die Werte mit einiger Annäherung auch noch für die Hälfte und das Doppelte der angegebenen Frequenz. Ferner ist beim Gebrauch dieser Zahlen folgendes zu beachten. Nachwirkung und dielektrischer Verlust werden durch Beimengungen und Verunreinigungen im Isolierstoff hervorgebracht und hängen von Art und Menge dieser Bestandteile ab. Beides kann bei demselben Isolierstoff je nach der Herkunft und Herstellungsweise stark schwanken; dasselbe gilt daher auch von dem dielektrischen Leistungsfaktor. Die Zahlen der Zahlentafel 3 sind somit als Mittelwerte aufzufassen, welche die bei handelsüblicher Beschaffenheit des Isolierstoffes zu erwartende Größenordnung des $\operatorname{tg}\delta$ angeben.

Weitere Angaben über dielektrische Verlustwinkel findet man in folgenden Literaturstellen:

G. L. Addenbrooke, Electrician Bd. 67 (1912), S. 829; Bd. 70 (1913), S. 673; Proc. of the Phys. Soc. of London, Bd. 27 (1915), S. 291 (Guttapercha und einige andere Stoffe bei sehr niedrigen Frequenzen); Proc. of the Phys. Soc. of London, Bd. 24 (1912), S. 286 (Oberflächenisolation bei Wechselstrom).

H. L. Curtis, Bull. of the Bur. of Stand. (Washington), Bd. 6 (1910), S. 431 (Eingehende Untersuchung von Glimmerkondensatoren).

J. A. Fleming und B. Dyke, Journ. Inst. of Electr. Eng. London, Bd. 49 (1912), S. 323 (verschiedene Stoffe, Einfluß der Temperatur und der Frequenz im Bereich von 900 bis 4500 Perioden in der Sekunde).

F. W. Grover, Bull. of the Bur. of Stand. (Washington), Bd. 7 (1911), S. 495 (Paraffin-Papierkondensatoren; Einfluß der Temperatur, der Frequenz und der Zeit; Temperaturbereich $\Theta = 10°$ bis 35°; $f = 33$ bis 1000 Perioden in der Sekunde).

H. F. Haworth, Proc. of the Roy. Soc. London (A), B. 81 (1908), S. 221 (Untersuchung von Porzellanplatten mit Gleichstrom und mit hochgespanntem Wechselstrom bei Frequenzen bis 200 Perioden in der Sekunde).

M. Höchstädter, ETZ 1910, S. 467 (Papierkabel für hohe Spannung; Messungen bis zur Durchschlagsgrenze bei Frequenzen zwischen 30 und 60 Perioden in der Sekunde).

---

[1]) Nr. 5, Gl. (22). Über Abweichungen von dem Quadratgesetz siehe Nr. 11.

Digitized by Google

H. Jordan, ETZ 1911, S. 127, 160; vgl. auch die Diskussion hierzu, S. 172 (Faserstoffe, Einfluß der Feuchtigkeit); Verhandl. d. Deutsch. Phys. Ges., Bd. 14 (1912), S. 451 (Untersuchung von Paraffin-Papierkondensatoren in einem weiten Frequenzbereich $f = 0$ bis 540 000 Perioden in der Sekunde).

B. Monasch, Ann. d. Phys. (4), Bd. 22 (1907), S. 905 (Meßverfahren; Einfluß der Feldstärke bei verschiedenen Stoffen).

L. Pungs, Archiv f. Electrot., Bd. 1 (1912), S. 329 (Untersuchung von Ölen bei hohen Spannungen und Frequenzen zwischen 15 und 75 Perioden in der Sekunde).

E. H. Rayner, Journ. of the Inst. of El. Eng., Bd. 49 (1912), S. 3 (Verschiedene Stoffe, dielektrische Verluste bei hoher Spannung; Literaturübersicht).

E. Schott, Jahrbuch der drahtl. Telegr. u. Telephonie, Bd. 18 (1921), S. 82 (Hochfrequenzverluste von Gläsern und einigen anderen Dielektricis; Messungen im Frequenzbereich $2 \cdot 10^5$ bis 10^6 Per/s und bei Temperaturen von $-80°$ bis $+400°$ C).

F. Tank, Ann. d. Phys. (4), Bd. 48 (1915), S. 307 (Verlauf der Nachladung in der Zeit 0,0003 bis 0,23 s nach dem Anlegen einer konstanten Spannung und Messungen bei 50 periodigem Wechselstrom an getränktem Papier und Glas; Untersuchungen an isolierenden Flüssigkeiten).

K. W. Wagner, Archiv f. Elektrot., Bd. 3 (1914), S. 67 (Messungen an Guttapercha, Balata und Gemischen aus solchen Stoffen, Balataharz, küntlichem Guttapercha, Kautschuk, Hartgummi, Paraffin, Ceresin, gewöhnlichem und paraffiniertem Papier, Drahtisolation aus Emaillelack, Baumwolle und Seide; Porzellanglocken).

Zahlentafel 3. Dielektrischer Leistungsfaktor.

Stoff	Frequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$	Temperatur Θ	10 000 tg δ
Balata, roh	1000	15	48
Balata, stark entharzt	1000	15	26
Bernstein (gepreßt)	$5 \cdot 10^5$	20	50
Bienenwachs	500	20	50
	800	20	75
	2000	20	130
	5000	20	206
Carta spezial (Kontinentale Isolawerke, Düren)	500 bis 5000	20	160
Cellon, hell	1000	20	330
	5000	20	400
Cellon, schwarz	1000	20	400
	5000	20	450
Ceresin	500	20	0,2
	1000	20	0,3
	5000	20	0,5
Ebonit (Hartgummi), gute Sorte	500 bis 5000	20	25 bis 35
geringe Sorte	500 bis 5000	20	230
Faturan (Traun u. Söhne, Hamburg)	1000	20	200 bis 1400
Flintglas (Schott u. Gen., Jena)	50	20	40
	1000	20	30
	5000	20	15
	50 000	20	8
	140 000	20	4

Digitized by Google

Stoff	Frequenz $f = \frac{\omega}{2\pi}$	Temperatur Θ	10 000 tg δ
Gläser, verschiedene	10^5 bis 10^6	20	4 bis 75
Glas (Spiegel-)	1000	17	180
Glimmer	50	20	3 bis 15
	1000	20	2 bis 10
	$5 \cdot 10^5$	20	2
Guttapercha	0,25	11	218
	1	11	195
	4	11	230
	16	11	200
	40	11	175
	350	11	240
	1000	11	260
	2000	11	280
	5000	11	280
	1000	5	260
	1000	15	240
	1000	25	150
Gutta-Gentzsch (künstl. Guttapercha)	1000	15	65
Kautschuk (Para), roh od. vulkanisiert	500	20	115
	5000	20	90
synthetisch	1000	20	200
Weichgummi (33% Paragummi)	500	20	170
	1000	20	150
	5000	20	110
Isolation (für Drähte)			
aus Emaillelack	1000	20	180
„ Seide	1000	20	400
„ Baumwolle	1000	20	3600
Papier-Luftraum-Isolation für Fernsprechkabel	1000	20	27
	10^4	20	40
	10^5	20	72
Papierisolation, getränkt für Starkstromkabel	50	20	50 bis 200
Papier, trocken	1000	20	40
Papier, getrocknet und mit Paraffin getränkt	50	20	30 bis 150
	1000	20	30 bis 100
Paraffin	500	20	0,5
	1000	20	0,8
	5000	20	1,2
Pertinax	1000	20	250
	5000	20	220
Porzellan	50	20	500
Paraffinöl[1]	50	15	2,9
Quarz	$5 \cdot 10^5$	20	1,2
Rizinusöl[1]	50	16,5	25
Tenazit 6 (A. E. G., Berlin)	500 bis 5000	20	200 bis 300
Transformatorenöl[1]	50	17,5	250

[1]) Reiner Leitungsverlust (Joulesche Wärme).

Digitized by Google

Besonderheiten der Stromleitung in festen Isolatoren.

10. Eigenleitung. a) Die Absonderung des Nachwirkungsstromes. Die Stromleitung durch einen Isolierstoff wird durch die in ihm enthaltene Feuchtigkeit stark beeinflußt. Wir wollen uns mit dem von der Feuchtigkeit herrührenden Teil der Leitfähigkeit später beschäftigen und betrachten zunächst nur solche Isolierstoffe, welche Feuchtigkeit nur in sehr geringem Maße enthalten, bzw. aufnehmen oder denen die Feuchtigkeit durch sorgfältiges Trocknen größtenteils

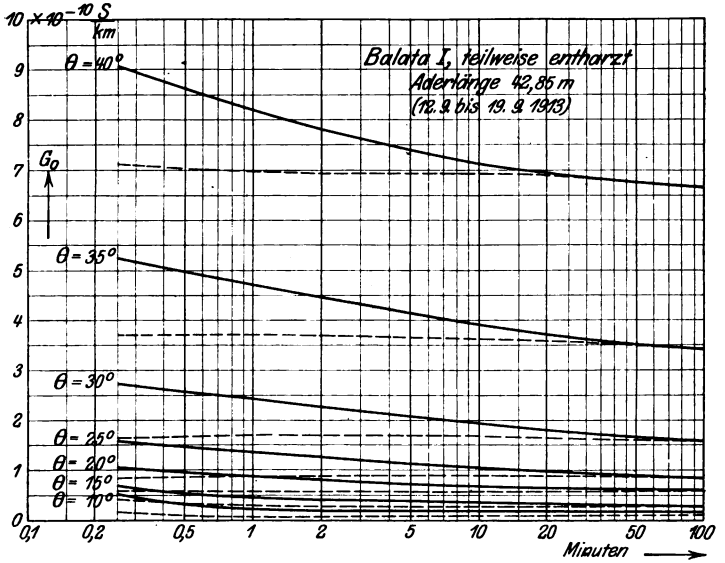


Abb. 17. Leitungsstrom und Nachladungsstrom eines mit Balata isolierten Seekabels.

entzogen ist. Der nach dem Anlegen einer Gleichspannung fließende Strom setzt[1]) sich aus zwei Teilen zusammen: dem eigentlichen Leitungsstrom und dem Nachladungsstrom, der allmählich verklingt. Beide überlagern sich, wie Abb. 17 dies beispielsweise für ein Seekabel mit Balataisolation zeigt[2]). Als Ordinaten sind hier die auf 1 Volt Spannung und 1 km Kabellänge umgerechneten Stromwerte aufgetragen, die den in Siemens/km ausgedrückten Zahlenwert G_0 der Gleichstromableitung ergeben. Die punktierten Linien stellen den reinen Leitungsstrom dar, der als Differenz der Ströme bei der Ladung und Ent-

[1]) Abgesehen von dem ersten Ladestromstoß.

[2]) Aus dem Archiv für Elektrot., Bd. 3 (1914), S. 81.

Digitized by Google

ladung bestimmt worden ist. Er erweist sich als praktisch unabhängig von der Zeit, wie es zu erwarten war.

Der Umstand, daß der von dem Isolierstoff aufgenommene Strom unmittelbar nach dem Anlegen der Spannung stark abnimmt, hat zu der gebräuchlichen Vorschrift geführt, daß der Isolationswiderstand „eine Minute nach dem Anlegen der Spannung" gemessen werden soll. Für viele praktische Zwecke mag diese Vorschrift genügen. Will man aber den wahren Isolationswiderstand bestimmen, so muß man viel länger warten, weil der Nachladestrom nach 1 min im allgemeinen noch beträchtliche Werte besitzt. Die Annäherung an den Endzustand ist leichter erkennbar, wenn man die Zeiten auf einer logarithmischen Teilung aufträgt, wie in Abb. 17 geschehen. Um ein völlig durchsichtiges Bild zu gewinnen, muß man den zeitlichen Stromverlauf außer bei der Ladung auch bei der Entladung ermitteln. Der Entladestrom ist reiner Nachwirkungsstrom; subtrahiert man ihn von dem Strom bei der Ladung, so erhält man den reinen Leitungsstrom. Dieses Verfahren ist dort nicht zu umgehen, wo der Leitungsstrom sich ebenfalls im Laufe der Zeit ändert (vgl. Nr. 11, Abb. 23).

Über den Mechanismus der Stromleitung in festen Isolierstoffen ist noch wenig bekannt. Für Glas haben E. Warburg und F. Tegetmeier[1]) nachgewiesen, daß die Leitung auf elektrolytischem Wege erfolgt. Träger des Stromes sind sehr wahrscheinlich die Ionen von Na_2SiO_3, das im Glas verbreitet ist wie ein Salz in seinem Lösungsmittel. Nur die Natriumionen sind beweglich; sie wandern beim Stromdurchgang zur Kathode. Besteht diese aus Quecksilber, so kann man das Natrium in dem dort gebildeten Natriumamalgam nachweisen. Beim Stromdurchgang verarmt die Umgebung der Anode an Natrium, und der Widerstand der Glasschicht steigt infolgedessen allmählich hoch an. Dies läßt sich durch die Verwendung einer Anode aus Natriumamalgam vermeiden, weil nunmehr der Strom aus der Anode ebensoviel *Na* in das Glas hinein befördert, als von der Anode nach der Kathode hin wegwandert. Die übertragene *Na*-Menge entsprach in allen Fällen genau dem Faradayschen Gesetz. Mittels einer Anode aus Lithiumamalgam ließ sich das *Na* im Glas allmählich vollständig durch *Li* ersetzen. Dagegen lassen sich *Ka*, *Ca*, *Mg*, *Al*, *Zn*, *Sn*, *Bi* und *Au* nicht auf elektrolytischem Wege in das Glas einführen; sie bilden offenbar keine im Glas beweglichen Ionen.

Es ist schwer, von dem Verhalten des Glases auf andere feste Stoffe zu schließen, da das Glas nach seinem sonstigen physikalischen

[1]) E. Warburg und F. Tegetmeier, Ann. d. Phys. (3), Bd. 32 (1887), S. 442 und Bd. 35 (1888), S. 455; F. Tegetmeier, Ann. d. Phys. (3) Bd. 41 (1890), S. 18.

Digitized by Google

Verhalten als eine außerordentlich zähe Flüssigkeit angesehen werden kann. Bei dieser Auffassung würde sich das Glas auch hinsichtlich der Stromleitung durchaus in den Rahmen der übrigen schlechtleitenden Flüssigkeiten einordnen (vgl. die Abschnitte Nr. 14 bis 16). Es ist jedoch bemerkenswert, daß E. Warburg und F. Tegetmeier in den bereits erwähnten Arbeiten nachweisen konnten, daß auch ein ausgesprochen fester Körper, nämlich Bergkristall (kristallisierter Quarz) elektrolytisch leitet. Die Leitfähigkeit hat allerdings nur bei erhöhter Temperatur (etwa von 230° ab) meßbare Werte, und auch nur für die mit der Hauptachse des Kristalls parallele Komponente der elektrischen Feldstärke. In allen zur Hauptachse senkrechten Richtungen ist die Leitfähigkeit des Quarzes auch bei höherer Temperatur unmeßbar klein. Die parallel zur Hauptachse beobachtete Leitfähigkeit des Quarzes verhält sich in jeder Hinsicht ebenso wie die Leitfähigkeit des Glases. Hervorgerufen wird sie durch Natrium- oder Lithiumionen, die in dem Quarz in geringer Menge[1]) vorhanden sind, und die man auch (mit Hilfe von Anoden aus dem entsprechenden Amalgam) gegeneinander austauschen kann.

Die Kombination Quecksilber, $|\overrightarrow{\text{Quarz}}|$ Natriumamalgam bildet ein galvanisches Element, dessen elektromotorische Kraft etwa 1,3 bis 2 Volt beträgt; der Quarz spielt die Rolle des Elektrolyts.

Im übrigen ist die physikalische Natur des Leitvermögens fester Isolierstoffe noch kaum erforscht. Man kann vermuten, daß die Leitung in vielen Fällen vorwiegend elektrolytisch ist, daß aber auch Leitungsvorgänge metallischer Natur und solche nach Art der in dichten Gasen auftretenden Ionenleitung[2]) eine gewisse Rolle spielen.

b) Einfluß der Temperatur. Die starke Zunahme der Leitfähigkeit mit steigender Temperatur geht aus Abb. 17 deutlich hervor. Zahlentafel 4 enthält für eine Reihe von Isolierstoffen das Verhältnis der Leitfähigkeit λ_{30} bei 30° zur Leitfähigkeit λ_{20} bei 20°.

Trägt man den Logarithmus von λ als Funktion der Temperatur Θ auf, so erhält man bei den meisten Stoffen gerade Linien oder schwach gekrümmte Kurven. Daraus folgt, daß man die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von Isolierstoffen angenähert durch einen Exponentialausdruck

$$\lambda_\Theta = \lambda_0 \cdot e^{\alpha\,\Theta}$$

darstellen kann. Die Konstante a liegt im allgemeinen zwischen 0,04 und 0,13, entsprechend einer Vergrößerung der Leitfähigkeit im Ver-

---

[1]) Die in den Kristallen enthaltene Natrium- oder Lithiummenge betrug in allen Fällen erheblich weniger als 1/1000 des Gewichtes.

[2]) Vgl. hierzu die Ausführungen in den Abschnitten Nr. 13 und Nr. 19.

Digitized by Google

hältnis 1:1,5 bis 1:3,6 bei einer Temperaturzunahme um 10° (vgl. Zahlentafel 4).

Zahlentafel 4. Einfluß einer Temperaturänderung von 10° auf die Leitfähigkeit.

Stoff	$\frac{\lambda_{30}}{\lambda_{20}}$	Stoff	$\frac{\lambda_{30}}{\lambda_{20}}$
Siegellack	0,9	Indischer rubinroter Glimmer, stark fleckig	2,7
Indischer, rubinroter Glimmer, leicht gefleckt	1,0	Opalglas	2,8
Brauner, heller, afrikanischer Glimmer	1,2	Tetrachlornaphthalin	2,9
Schellack	1,5	Glyptol	3,0
Elfenbein	1,6	Hartfiber	3,2
Unglasiertes Porzellan	1,6	Plattenglas	3,2
Weißes Zelluloid	1,8	Paraffiniertes Ahornholz	3,6
Heller Glimmer	2,0	Paraffiniertes Pappelholz	3,6
Technisches Paraffin	2,0—4,0	Kolophonium	3,6
Deutsches Glas	2,5—3,5	Schwefel	4,9
Roter Fiber	2,6	Gelbes Bienenwachs	16

11. Einfluß der Feuchtigkeit. Viele Isolierstoffe, namentlich poröse und faserige, saugen aus der Luft beträchtliche Mengen Feuchtigkeit auf. Ihre Leitfähigkeit wird dadurch oft sehr stark beeinflußt. Es ist recht schwierig, die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Luftfeuchtigkeit zu bestimmen, da die meisten Isolierstoffe das einmal aufgenommene Wasser bei einer Abnahme der Luftfeuchtigkeit nur sehr langsam wieder abgeben (Einfluß der kapillaren Kräfte). Daher kommt es z. B., daß sich die Isolation von Faserstoffkabeln in Fernsprechämtern in Räumen mit veränderlicher Luftfeuchte beständig verschlechtert.

Curtis[1]) fand, daß Bakelit, roter Fiber, Marmor, Schiefer und weißes Zelluloid, die zunächst etwa 1 Monat lang einer Luftfeuchte von 90% ausgesetzt gewesen waren und dann in einem Raum mit 25% Feuchtigkeit gebracht wurden, selbst nach Ablauf von 40 Tagen noch keinen Endzustand erreicht hatten; dabei war der Widerstand des Zelluloids auf das 5fache, der des Schiefers auf etwa das 50fache, der des Marmors auf etwa das 80fache, der des Bakelits auf mehr als das 300fache gestiegen. Bei Schellack wurde trotz beträchtlicher Wasseraufnahme keine Veränderung des spezifischen Widerstandes bemerkt[2]).

Isolierstoffe, deren Leitfähigkeit vorwiegend von der von ihnen

[1]) Bull. of the Bur. of Stand. (Washington), Bd. 11 (1915), S. 359.

[2]) Nach einer freundlichen Mitteilung des Herrn E. Warburg deckt sich diese Angabe mit seinen eigenen Beobachtungen und mit denen anderer Forscher.

Digitized by Google

aufgesogenen Feuchtigkeit herrührt, die in den kapillaren Räumen des faserigen oder porösen Stoffes verteilt ist, haben die merkwürdige Eigenschaft, daß ihre Leitfähigkeit und mithin auch ihr Isolationswiderstand von der Spannung abhängt. Man hat hierfür das empirische Gesetz

$$R = \frac{\text{const}}{\sqrt{U}}$$

gefunden, worin R den Isolationswiderstand, U die Spannung bedeutet, bei der man R gemessen hat. Das Gesetz wird gelegentlich auch in der Form ausgesprochen, daß der Widerstand bei zehnfacher Spannung auf den dritten Teil ($\approx 1:\sqrt{10}$) sinkt.

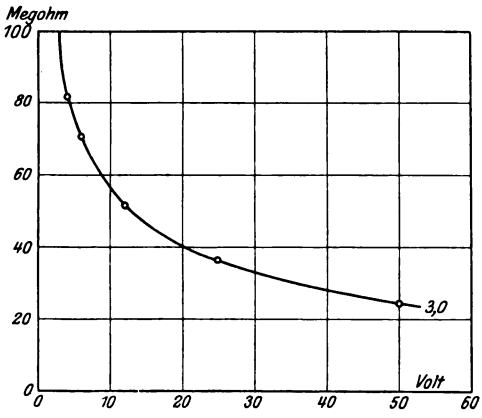


Abb. 18. Isolationswiderstand von Baumwolle für Spannungen zwischen 3 und 50 Volt.

Die Abb. 18 und 19 zeigen als Beispiele den Isolationswiderstand einer Baumwollprobe für den Spannungsbereich von 3 V. bis 500 V. Für gewöhnliches und getränktes Papier, Mikanittuch und dergleichen erhält man ähnliche Kurven. Baumwolle, die nach scharfem Trocknen mit Isolierlack getränkt worden ist, weist anfangs einen von der Spannung unabhängigen hohen Isolationswiderstand auf. Beim Liegen an der Luft nimmt sie aber allmählich trotz der Tränkung Feuchtigkeit auf, wobei der Isolationswiderstand beträchtlich abnimmt; zugleich stellt sich wieder die durch die Abb. 18 und 19 veranschaulichte Abhängigkeit des Widerstandes von der Spannung ein. Kurven dieser Art erhält man stets bei allen faserigen Isolierstoffen unter den gewöhnlichen Feuchtigkeitsverhältnissen. Erst wenn der Wassergehalt so groß wird, daß man die Stoffe als „feucht" bezeichnen kann, flachen sich die Widerstandskurven wieder ab, und im durchnäßten Zustande besitzen diese Körper wieder einen von der Spannung so gut wie unabhängigen Widerstand.

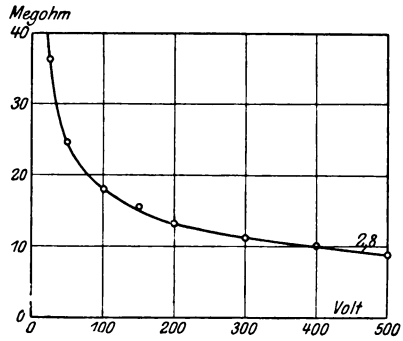


Abb. 19. Isolationswiderstand von Baumwolle für Spannungen zwischen 30 und 500 Volt.

Digitized by Google

Der Isolationswiderstand der betrachteten Stoffe hat ferner die Eigentümlichkeit, daß er den Änderungen der Spannung nicht sogleich folgt, sondern hinter ihnen zeitlich nachhinkt. Wird z. B. bei einer Meßreihe die Spannung zuerst erhöht, dann erniedrigt, so liegen die Widerstandswerte bei abnehmender Spannung unterhalb der Werte für zunehmende Spannung (Abb. 20). S. Evershed[1]) ist es gelungen, diese rätselhaften Abweichungen von dem Ohmschen Gesetz durch sinnreiche Versuche aufzuklären[2]).

Zunächst wurde chemisch reines, trockenes Filtrierpapier mit Wasser von bekannter Leitfähigkeit getränkt und der Isolationswiderstand bei verschiedenem (durch Wägung bestimmtem) Wassergehalte gemessen. Da die Leitfähigkeit des Wassers bekannt ist, kann man unter Zugrundelegung des gemessenen Isolationswiderstandes schätzen, wieviel von dem aufgesogenen Wasser an der Stromleitung beteiligt ist. Man findet, daß dies stets ein sehr geringer Bruchteil ist; seine Größenordnung liegt zwischen 1 und 100 Millionsteln. Man hat sich dieses Wasser in einem Netz von engen Kanälen angeordnet zu denken, das die Stromleitung von Elektrode zu Elektrode vermittelt. Das übrige Wasser befindet sich in Form von Tröpfchen, blinden Kanälen und ähnlichen Gebilden.

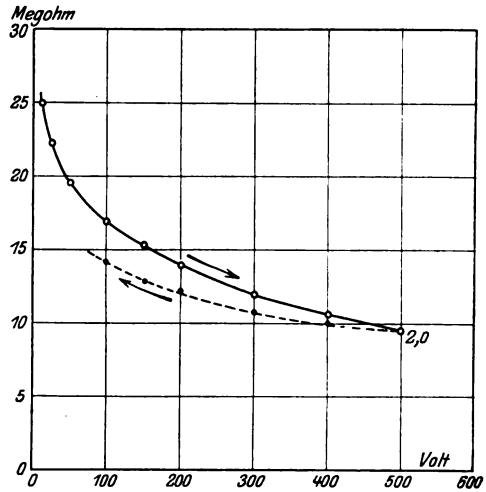


Abb. 20. Isolationswiderstand einer Ankerwicklung (zeitliches Zurückbleiben der Widerstandsänderungen hinter den Spannungsänderungen).

Ausgehend von dieser Vorstellung hat Evershed das in Abb. 21 dargestellte elementare Modell eines faserigen Isolierstoffes konstruiert. Es besteht aus zwei mit Wasser gefüllten Näpfen, die durch eine Glasröhre von 0,3 bis 0,35 mm lichter Weite verbunden sind. Die Röhre ist nur teilweise gefüllt, derart, daß sich in ihr eine Anzahl von Luftblasen befinden. Das obere vergrößerte Bild einer solchen Luftblase

[1]) Journ. of the Inst. of El. Eng. (London), Bd. 52 (1913), S. 51.

[2]) Hierzu muß bemerkt werden, daß die weiter unten (Nr. 15) erörterten Eigentümlichkeiten der elektrolytischen Leitung in demselben Sinne wirken wie die von Evershed entdeckte Erscheinung.

Digitized by Google

zeigt, daß die Stromleitung hier nur durch die kapillare Wasserhaut an der Röhrenwand übernommen wird. Der Widerstand des Modells steckt daher in der Hauptsache nur in diesen Wasserhäuten. Nun zeigt es sich, daß sich die Wasserhaut verdickt, wenn man die an das Modell angelegte Spannung erhöht; vermutlich, weil die mechanische Oberflächenspannung des Wassers im elektrischen Felde abnimmt. Das Modell besitzt also einen mit steigender Spannung abnehmenden Widerstand. Die Beobachtung unter dem Mikroskop zeigt, daß bei einer Spannungserhöhung die Verdickung am positiven Ende der Blase beginnt und als Wanderwelle *F* (siehe Abb. 21) nach dem negativen Ende hin fortschreitet. Die Widerstandsänderung bleibt daher zeitlich hinter der Spannungsänderung zurück.

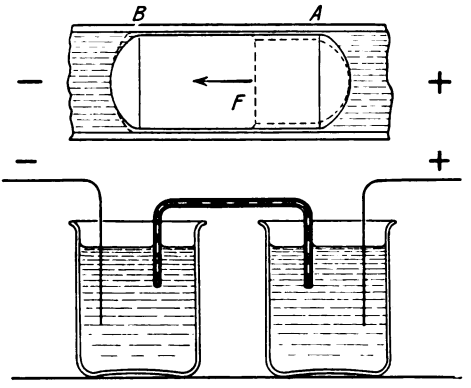


Abb. 21. Modell eines Faserstoffisolators nach Evershed.

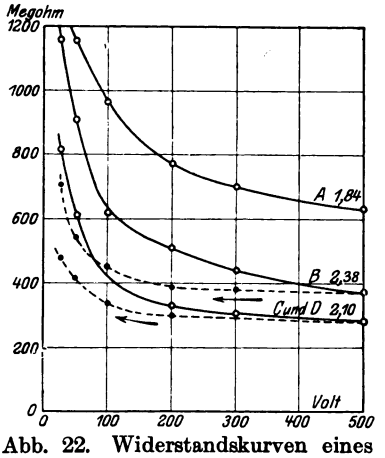


Abb. 22. Widerstandskurven eines Modellisolators.
A. 20 Stunden nach Füllung der Röhren.
B. 44 „ „ „ „ „
C. 98 „ „ „ „ „
D. 113 „ „ „ „ „

Bereits die an dem einfachen Modell nach Abb. 21 aufgenommenen Widerstandskurven zeigen eine überraschende Ähnlichkeit mit den an Faserstoffen gefundenen Kurven. Die Übereinstimmung wird noch erheblich besser, wenn man das Modell aus einer größeren Zahl von parallel geschalteten Röhren herstellt, weil sich dann die kleinen Unregelmäßigkeiten im Verhalten der einzelnen Röhren im Mittel aufheben. Abb. 22 zeigt Kurven, die an einem Modellisolator aus 13 Röhren aufgenommen worden sind und die insbesondere auch die charakteristischen Nachwirkungserscheinungen[1]) aufweisen, wegen derer es bekanntlich bei Faserstoffen schwierig ist, einwandfreie und vor allem reproduzierbare Isolationsmessungen zu machen.

[1]) Diese haben natürlich mit der dielektrischen Nachwirkung nichts zu tun.

Digitized by Google

Nach dem soeben ausgeführten hängt die Verteilung der Feuchtigkeit in und zwischen den Fasern und Poren von der angelegten Spannung ab und kann Änderungen der Spannung nur allmählich folgen. Dadurch erklären sich auch folgende Beobachtungen:

a) Der als Differenz der Ströme bei Ladung und Entladung ermittelte reine Leitungsstrom faseriger Isolierstoffe nimmt in der Zeit nach dem Anlegen der Spannung zu. Abb. 23 zeigt dies für gewöhnliches ungetrocknetes Kondensatorpapier. i ist der Strom bei der Ladung, i_N bei der Entladung, $i_L = i - i_N$ der reine Leitungsstrom.

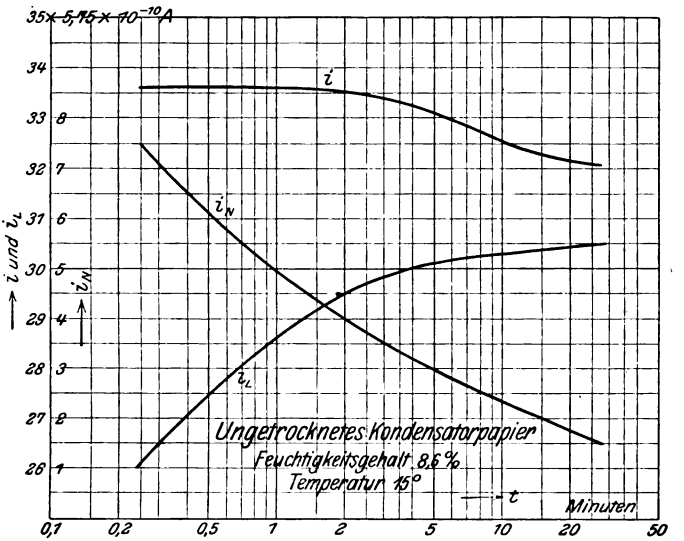


Abb. 23. Leitungsstrom und Nachladungsstrom von ungetrocknetem Papier (Anstieg des Leitungsstromes infolge des Evershedeffektes).

Es kann vorkommen, daß die Kurve für i_L bei größeren Werten von t schneller steigt, als i_N abnimmt; dann muß die Kurve des Gesamtstromes i nach anfänglicher Einsenkung später wieder ansteigen. Auch solche Kurven werden beobachtet.

b) Wegen des Einflusses, den das elektrische Feld auf die Verteilung der Feuchtigkeit in dem Faserstoffe hat, ist auch eine Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften bei Wechselstrom, insbesondere des Verlustwinkels, von der Spannung vorauszusehen, und zwar muß dieser Winkel mit steigender Spannung anwachsen. Man kann sogar darüber hinaus noch sagen, daß diese Abhängigkeit um so stärker hervortreten muß, je niedriger die Frequenz ist, weil die Verteilung der Feuchtigkeit schnellen Spannungsänderungen in weniger hohem Maße zu folgen vermag als langsamen.

Digitized by Google

Diese Voraussagen finden sich in den durch Abb. 24 veranschaulichten Messungsergebnissen an einem mit Seide und Baumwolle besponnenen Lackdraht bestätigt.

Ebenso erklärt es sich, daß man bei Hochspannungskabeln mit getränkter Papierisolation einen mit der Spannung langsam wachsenden dielektrischen Leistungsfaktor findet, wenn man die Messung mit hoher Spannung macht. Aus dem gleichen Grunde nimmt hier $tg\delta$ bei konstanter Spannung im Laufe der Zeit etwas zu. Man braucht zur Erklärung keineswegs den Wassergehalt heranzuziehen, da auch die Verteilung der Tränkungsflüssigkeit sich unter der Einwirkung starker Felder ein wenig ändert[1]). In allen Fällen, in denen $tg\delta$ mit der Spannung wächst, nehmen die dielektrischen Verluste (abweichend von der Regel) schneller zu als das Quadrat der Spannung, was aus der Gl. (22) ohne weiteres hervorgeht.

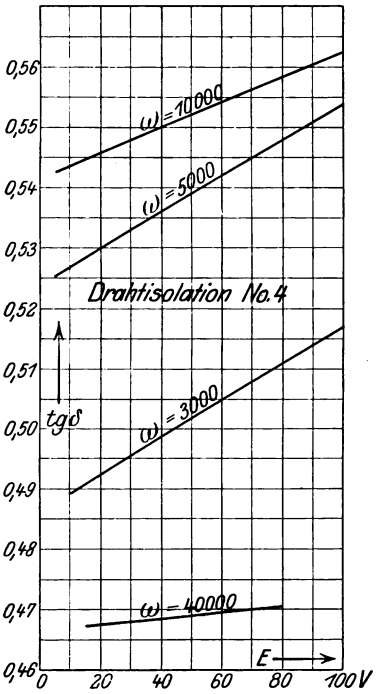


Abb. 24. Spannungsabhängigkeit des Dielektrischen Leistungsfaktors eines mit Baumwolle und Seide besponnenen Lackdrahtes infolge des Evershedeffektes.

12. Der Oberflächenwiderstand. a) Allgemeines. Auf der ebenen Oberfläche eines Isolators befinden sich 2 Elektroden a_1, a_2 (Abb. 25) von der Länge b im Abstande a. Ist R der zwischen a_1 und a_2 gemessene Isolationswiderstand, so bezeichnen wir mit

$$\sigma = \frac{Rb}{a}$$

den spezifischen Oberflächenwiderstand. Der von a_1 nach a_2 überfließende Strom besteht aus einem Anteil, der durch die Feuchtigkeitsschicht auf der Oberfläche geleitet wird, und aus einem zweiten Anteil, der durch den Isolator selbst fließt. Es hängt ganz von den Umständen ab, welcher Teil überwiegt; bei trockener Luft und schlechten Isolatoren ist es der zweite, bei feuchter Luft und guten Isolatoren der erste. Häufig sind beide von derselben Größenordnung. Daraus ersieht man, daß die Oberflächenleitung sich sehr stark mit der Luftfeuchtigkeit ändern

[1]) Man beachte indessen, daß die elektrolytische Natur der Leitung in den angeführten Beispielen gleichartige Anomalien bei Wechselstrom hervorbringen kann.

Digitized by Google

muß; in geringerem Maße ist eine Abhängigkeit von der Temperatur zu erwarten; ein nennenswerter Einfluß der Spannung ist nicht vorhanden.

b) Einfluß der Luftfeuchtigkeit. Die bereits erwähnte Arbeit von Curtis enthält auch Untersuchungen über den Oberflächenwiderstand. Die folgenden Angaben stützen sich z. T. auf die Ergebnisse dieser Arbeit. Proben verschiedener Isolierstoffe wurden in einen Kasten gebracht, dessen Luftfeuchtigkeit durch Schwefelsäure von bestimmter Dichte auf auf konstanter Höhe gehalten wurde; nach Ablauf von jedesmal 18 bis 20 Stunden wurde die Messung ausgeführt. Die Luftfeuchtigkeit wurde in den Stufen 25, 50, 70, 85 und 95% verändert; es wurde zuerst bei steigender, dann bei fallender Feuchtigkeit gemessen. Die gefundenen Kurven zeigen ein deutliches Nachhinken des Widerstandes hinter den Veränderungen der Feuchtigkeit. Besondere Versuche haben gelehrt, daß nach einer Herabsetzung der Feuchtigkeit von 95 auf 29% selbst nach vielen Tagen noch kein Endzustand erreicht worden war. Der Oberflächenwiderstand der meisten Stoffe ändert sich zwischen 25 und 95% Luftfeuchtigkeit um viele Zehnerpotenzen, häufig im Verhältnis von 10^7 zu 1. Bemerkenswert ist, daß diejenigen Stoffe, auf denen sich keine zusammenhängende Wasserhaut bilden kann, einen sehr hohen und von der Luftfeuchtigkeit nahezu unabhängigen Oberflächenwiderstand haben. Das trifft vor allem bei Ceresin, Paraffin, Bienenwachs, Tetrachlornaphthalin, Siegellack und Kolophonium zu; nicht ganz so gut sind Schwefel, Bernstein, Glyptol und Zelluloid.

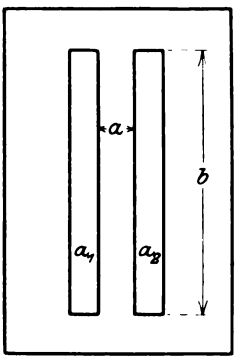


Abb. 25. Anordnung zur Messung des Oberflächenwiderstandes.

c) Einfluß der Temperatur. Bei niedriger Luftfeuchtigkeit ist die Veränderung des Oberflächenwiderstandes mit der Temperatur bedingt durch die Temperaturabhängigkeit des durch den Isolator fließenden Stromes. Es wurde deshalb untersucht, ob sich bei einer Luftfeuchtigkeit von 94% in dem Temperaturbereich von 25° bis 31° eine deutliche Abhängigkeit des Oberflächenwiderstandes von der Temperatur zeigt. Die größte beobachtete Veränderung bestand in einer Abnahme des Oberflächenwiderstandes im Verhältnis 3 : 1; in einigen Fällen wurde bei steigender Temperatur eine Zunahme beobachtet. Man kann daher wohl allgemein sagen, daß im Bereich der Zimmertemperatur die Temperaturabhängigkeit des Oberflächenwiderstandes neben dem weitaus stärkeren Einfluß der Schwankungen der Luftfeuchtigkeit vollkommen verschwindet.

Digitized by Google

d) Einfluß des Lichtes. Es ist bekannt, daß die Oberfläche von Hartgummi durch Sonnenlicht verdorben wird. Es bilden sich Schwefelsäure, bzw. schwefelsaure Salze, die der Wasserhaut auf der Oberfläche eine große Leitfähigkeit verleihen; dadurch sinkt der Oberflächenwiderstand auf einen Bruchteil von etwa 10^{-7} seines früheren Wertes. Man kann derartig verdorbene Hartgummioberflächen leicht in der folgenden Weise reinigen. Man spült sie zuerst in einer verdünnten Ammoniaklösung und wäscht sie dann gründlich in wiederholt erneuertem destillierten Wasser; zuletzt werden sie gut getrocknet. Man kann sie dann noch mit etwas feinem Öl einreiben, wodurch übrigens nur das Aussehen, aber nicht die Oberflächenisolation verbessert wird. Durch dieses Verfahren wird der ursprüngliche Wert des Oberflächenwiderstandes wieder hergestellt.

Auf andere Isolierstoffe war der Einfluß des Sonnenlichtes gering; eine 20 stündige Bestrahlung mit ultraviolettem Licht hatte bei einigen künstlichen Isolierstoffen ein nicht unbeträchtliches Herabgehen der Oberflächenisolation zur Folge. Bemerkenswert ist noch, daß eine dünne Bakelitschicht auf Hartgummi zwar den ursprünglichen Oberflächenwiderstand erhöht, aber nicht verhindert, daß das Licht die Oberfläche im Laufe der Zeit verdirbt.

e) Dicke der Oberflächenschichten. Sie ist, namentlich bei Quarz, von verschiedenen Forschern durch Wägung bestimmt worden. Es fanden sich Werte zwischen $3 \cdot 10^{-6}$ mm (bei gereinigtem Quarz) bis $100 \cdot 10^{-6}$ mm (bei Glas). Verunreinigungen der Oberfläche, vor allem wassergierige Salze, erhöhen die Dicke der Wasserhaut. Die aus dem Oberflächenwiderstand und der Schichtdicke berechnete Leitfähigkeit der Wasserhaut ist oft recht groß; doch genügen schon verschwindend geringe Salzmengen, um derartige Leitfähigkeiten hervorzubringen.

f) Wahrer Oberflächenwiderstand. Zur Bestimmung der wahren Oberflächenleitung muß man von dem Gesamtstrom den Teil des Stromes abziehen, der durch den Isolator fließt. Der entsprechende Isolationswiderstand läßt sich nach Formeln von J. J. Thomson[1]) für zwei einfache Anordnungen angeben.

1. Für zwei lange Streifenelektroden auf einem sehr dicken Isolator (Abb. 26) ist der Durchgangswiderstand, bezogen auf 1 cm Streifenlänge

$$R = \frac{2K}{K'} \varrho.$$

Darin bedeuten K und K' die vollständigen elliptischen Integrale erster Art[2]) für die Moduln k und k', wobei

[1]) „Recent researches in electricity and magnetism", S. 238; Oxford 1893.
[2]) Zahlentafeln dieser Integrale bei Jahnke-Emde, „Funktionentafeln" Leipzig 1909, S. 68.

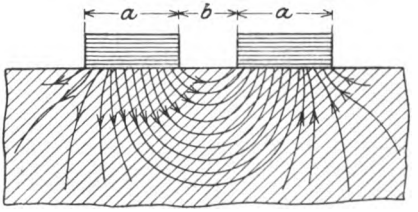
Digitized by Google

$$k = \frac{b}{b + 2a} \text{ und } k' = \sqrt{1 - k^2},$$

σ ist der spezifische Widerstand; $\varrho = \frac{1}{\lambda}$.

Nach diesen Formeln sind die ersten vier Werte der folgenden Zahlentafel 5 berechnet.

2. Eine andere Anordnung, deren Widerstand der Berechnung zugänglich ist, zeigt Abb. 27. Zwei unendlich breite Elektroden vom



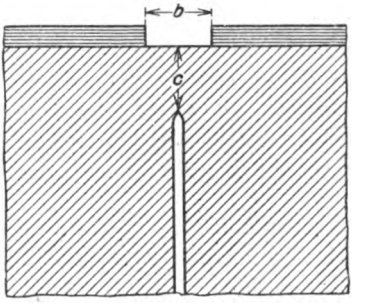


Abb. 26 und 27. Anordnungen, für welche der Durchgangswiderstand genau berechenbar ist.

Abstand b ruhen auf einem Isolator, der in der Mitte bis zur Tiefe c geschlitzt ist. Der Widerstand für 1 cm Elektrodenlänge beträgt[1])

$$R = \frac{2K'}{K} \varrho,$$

wobei die Moduln der elliptischen Integrale K und K' nunmehr

$$k = \frac{c}{4b^2 + c^2} \text{ und } k' = \frac{2b}{4b^2 + c^2}$$

sind. Die beiden letzten Werte der Zahlentafel 5 sind hiernach berechnet.

Zahlentafel 5.

Streifenbreite a	Streifenabstand b	Dicke c des Isolators in der Mitte	Widerstand R
0,01 cm	1 cm	∞	3,9 ϱ
0,1 „	1 „	∞	2,4 ϱ
1 „	1 „	∞	1,3 ϱ
10 „	1 „	∞	0,7 ϱ
∞	1 „	1,0 cm	2,7 ϱ
∞	1 „	0,5 „	3,6 ϱ

Aus diesen Werten ist zu schließen, daß bei den üblichen Prüfstücken von endlicher Dicke etwa $R = 3\varrho$ zu setzen ist. Der ge-

[1]) J. J. Thomson, a. a. O., S. 243.

Digitized by Google

messene Oberflächenwiderstand r setzt sich aus dem wahren Oberflächenwiderstand σ und dem Durchgangswiderstand $R = 3\varrho$ zusammen, so daß man

$$r = \frac{3\varrho\sigma}{3\varrho + \sigma}$$

hat, woraus

$$\sigma = \frac{3r\varrho}{3\varrho - r}$$

folgt. Ist r angenähert gleich 3ϱ, so kann man nur sagen, daß der wahre Oberflächenwiderstand sehr hoch ist, ohne daß es möglich wäre, ihn näher anzugeben. Grundsätzlich kann r nie höher als etwa 3ϱ werden; daß in der folgenden Zahlentafel 6 einige höhere Werte vorkommen, liegt an den Ungenauigkeiten der Messung, die in der Natur der Sache begründet sind.

Zahlentafel 6. Werte des spezifischen Widerstandes ϱ des spezifischen Oberflächenwiderstandes r und des wahren spezifischen Oberflächenwiderstandes σ bei niedriger Luftfeuchtigkeit (20% und weniger).

Stoff	ϱ	r	σ
Weißes Zelluloid	$2 \cdot 10^{10}$	$10 \cdot 10^{10}$	—
Plattenglas	$2 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{13}$	—
Tetrachlornaphthalin	$5 \cdot 10^{13}$	$10 \cdot 10^{13}$	$30 \cdot 10^{13}$
Gummon	$3 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{12}$
Gelbes Stabilit	$4 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$9 \cdot 10^{13}$
Mikanit	$10 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$
Glyptol	$10 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$
Ambroid	$50 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$

g) Oberflächenwiderstand bei Wechselstrom. Der mit Wechselstrom gemessene Oberflächenwiderstand ist im allgemeinen wesentlich niedriger als der mit Gleichstrom gemessene[1]). Dies rührt daher, daß der Gleichstrom nur in solchen Pfaden fließen kann, in denen die Feuchtigkeit eine zusammenhängende Haut bildet, die sich von dem einen Pol bis zum andern erstreckt. Anders der Wechselstrom; er kann daneben auch noch in nicht leitend zusammenhängenden Bahnen verlaufen, indem er sich über die Unterbrechungsstelle hinweg als Kapazitäts-(Verschiebungs-)strom fortsetzt.

Bei der Messung fertiger Gebrauchstücke aus Isolierstoff erhält man (ebenso wie bei der unter a besprochenen Anordnung) fast immer einen Kombinationswert aus Oberflächen- und Durchgangswiderstand.

[1]) Hierauf hat zuerst G. L. Addenbrooke hingewiesen (Proc. of the Phys. Soc. of London, Bd. 24 (1912), S. 286.

Digitized by Google

Ein Beispiel hierfür gibt die folgende Messung an Porzellan-Doppelglocken-Isolatoren der Reichstelegraphen-Verwaltung. Die Glocken sind mit dem Kopf nach unten in eine Wanne mit salzhaltigem Wasser eingesetzt worden, das bis an den Bund des Isolators reichte. In den zur Aufnahme des Bolzens bestimmten Hohlraum wurde Salzwasser etwa bis zur gleichen Höhe eingegossen. Hier wurde der Strom mittels einer eingetauchten Kupferspirale von genügender Oberfläche zugeführt; den anderen Pol bildete die Zinkwanne. Die Meßeinrichtung war zwar empfindlich genug, um die Messung eines einzigen Isolators zu ermöglichen; da aber hierbei die wegen der Kapazität der Zuleitung anzubringenden Korrektionen ungefähr ebensogroß sind wie die zu messenden Größen, sind im allgemeinen 16 Stück parallel geschalteter Isolatoren der gleichen Art gemessen worden. Es zeigte sich, daß die Verlustwinkel von Tag zu Tag stark schwankten.

Zahlentafel 7. Kapazität und Leistungsfaktor von Porzellanglocken-Isolatoren.

Datum	Temperatur	Kreisfrequenz ω	Kapazität einer Glocke in $10^{-6}\ \mu F$	Leistungsfaktor tg δ
16. VIII. 13	20°	5 000	32,3	0,0338
28. VIII. 13	19,5°	3 000	31,4	0,0809
		5 000	30,3	0,0758
		10 000	29,2	0,0660
		30 000	27,8	0,0494
5. IX. 13	18,2°	3 000	31,7	0,0467
		5 000	31,2	0,0430
		10 000	30,6	0,0352
		30 000	30,0	0,0265
6. IX. 13	18,6°	3 000	31,5	0,0543
		5 000	30,9	0,0397
		10 000	30,4	0,0322
		30 000	29,8	0,0241

Die Ursache hiervon liegt an der veränderlichen Oberflächenbeschaffenheit. Je nach der Luftfeuchtigkeit und je nach Art und Stärke der unvermeidlichen Temperaturschwankungen bedeckt sich der Isolator mit einer mehr oder minder starken Feuchtigkeitshaut, und dementsprechend schwankt auch die Stärke des über die Oberfläche hinwegfließenden Stromes. Der gemessene Leistungsfaktor tg δ enthält die dielektrischen Verluste im Innern des Porzellans und die Leitungsverluste in der Oberflächenschicht.

Digitized by Google

13. Ionisierung durch radioaktive Strahlung. Nach Untersuchungen von Hodgson[1]) wird die Leitfähigkeit von guten Isolatoren durch radioaktive Strahlung stark erhöht. Dünne Platten aus festem Paraffin und Hartgummi, die mit Stanniolbelägen versehen waren, wurden mit einem Radiumpräparat, das 5 mg reines Radiumbromid enthielt, aus einigen Zentimetern Abstand bestrahlt. Während vor der Bestrahlung kein meßbarer Strom durch den Isolierstoff floß, ergaben sich während der Bestrahlung die Werte

für Paraffin $2{,}2 \cdot 10^{-13}$ A. bei der Feldstärke 260 V/cm,
für Hartgummi $1{,}5 \cdot 10^{-13}$ A. bei der Feldstärke 520 V/cm.

Die durch die genannte kräftige Bestrahlung hervorgerufene Leitfähigkeit bildet sich innerhalb weniger Minuten aus. Nach beendeter Bestrahlung verschwindet sie wieder nach und nach; und zwar die Hälfte davon innerhalb einer Stunde, während der Rest sehr viel langsamer verklingt.

Eine ähnliche Wirkung hat die radioaktive Strahlung bei isolierenden Flüssigkeiten. Hier ist diese Erscheinung bereits eingehender untersucht worden, und wir werden im folgenden noch darauf zurückkommen (Nr. 19).

Besonderheiten der Stromleitung in flüssigen Isolatoren.

14. Allgemeines. Die Stromleitung in flüssigen Isolatoren ist nach den grundlegenden Untersuchungen von E. Warburg[2]) im wesentlichen eine elektrolytische. Die Träger des Stromes, die positiven und negativen Ionen rühren vermutlich von irgendwelchen Beimengungen her, die in geringer Menge in der isolierenden Flüssigkeit gelöst und mehr oder minder dissoziiert, d. h. in Ionen gespalten sind. Daß es sich um elektrolytische Leitung handelt, ergibt sich aus der Tatsache, daß die Stromleitung in flüssigen Isolatoren dieselben Eigentümlichkeiten aufweist und die gleichen Gesetzmäßigkeiten befolgt, wie die Stromleitung in wohlbekannten Elektrolyten. Für die Auffassung, daß die elektrolytischen Ionen größtenteils von gelösten Beimengungen (Verunreinigungen) herrühren, spricht der Umstand, daß man die Leitfähigkeit vieler flüssiger Isolatoren durch sorgfältiges, mehrfach wiederholtes Destillieren weitgehend herabsetzen kann.

15. Drei typische Fälle elektrolytischer Leitung. Fall a. In einem Gefäß (Abb. 28) mit zwei Elektroden 1 und 5 aus unlöslichem Stoff, befinde sich eine wässerige Lösung von Schwefelsäure (H_2SO_4). Bei hinreichender Verdünnung sind die Schwefelsäuremoleküle sämtlich in Ionen zerspalten, und man hat sich die Kationen H_2 und die Anionen SO_4

[1]) Phil. Mag. (6), Bd. 18 (1909), S. 252.
[2]) Ann. d. Phys. (3), Bd. 54 (1895), S. 396.

Digitized by Google

als gleichförmig in der Flüssigkeit verteilt vorzustellen, wie Abb. 28, a, oben es schematisch zeigt. Wird die Elektrode 1 mit dem positiven, die Elektrode 5 mit dem negativen Pol einer Gleichstromquelle verbunden, so wandert unter dem Einfluß des elektrischen Feldes das Anion SO_4 zur Anode, das Kation H_2 zur Kathode; an den Elektroden geben die Ionen ihre Ladungen ab, wodurch die Stromleitung zustande kommt. Das neutralisierte H_2 wird an der Kathode als gasförmiger Wasserstoff abgeschieden, während sich SO_4 an der Anode unter Aufnahme von Wasser und Abspaltung von gasförmigem Sauerstoff zu H_2SO_4 regeneriert. Als Folge dieser Vorgänge wird die Ionenkonzentration und damit die Leitfähigkeit an der Kathode erniedrigt, an der Anode erhöht. Die zahlenmäßigen Verhältnisse sowie der zeitliche Verlauf der Dinge sind (für ein bestimmtes Versuchsbeispiel) aus der folgenden Zahlentafel 8 ersichtlich[1]). Darin bedeutet t die Zeit nach dem Einschalten, Θ die Temperatur (die möglichst konstant sein sollte), i der Strom in Mikroampere, R der Widerstand zwischen Anode und Kathode in Megohm. λ_{12} ist die Leitfähigkeit der Flüssigkeitssäule zwischen der Anode 1 und der Spannungsmeßsonde 2; λ_{23} bedeutet entsprechend die Leitfähigkeit der Flüssigkeitssäule zwischen den Sonden 2 und 3; und so fort. Dabei sind die zu Beginn des Versuchs vorhandenen Leitfähigkeitswerte jeweils gleich 100 gesetzt (siehe Zahlentafel 8 S. 50).

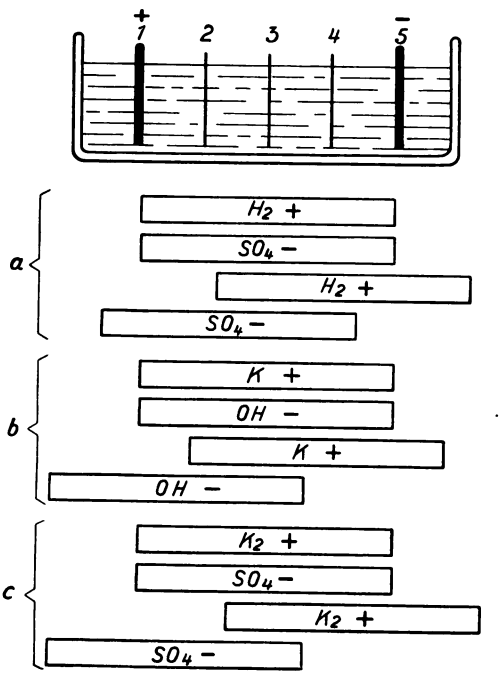


Abb. 28. Zur Untersuchung der Stromleitung in Flüssigkeiten.

Nimmt man die Spannung von den Elektroden weg, so stellt sich durch die Wirkung der Diffusion die ursprüngliche Konzentration und demgemäß auch der anfängliche Wert der Leitfähigkeit allmählich wieder her.

[1]) Diese, sowie die Zahlentafeln 9 bis 14 sind der vorher erwähnten Arbeit von Warburg entnommen.

Digitized by Google

Zahlentafel 8. (Schwefelsäure)[1]).

t	ϑ	i	λ^{+}_{12}	λ_{23}	λ_{34}	λ^{-}_{45}	R
0	18,3	99,1	100	100	100	100	0,103
1h 48m	18,9	91,4	125	108	91	92	0,107
6h 24m	17,9	69,3	136	127	93	38	0,141
22h 10m	16,7	62,2	129	106	89	31	0,164

Die Zahlentafel zeigt deutlich, wie infolge der Ionenwanderung die Leitfähigkeit in der Umgebung der Anode wächst, in der Umgebung der Kathode abnimmt. Daß dabei im ganzen eine Widerstandserhöhung herauskommen muß, macht man sich leicht an Hand einer einfachen Überschlagsrechnung klar. Es möge z. B. die Ionendichte in den beiden mittleren Gebieten $\overline{23}$ und $\overline{34}$ unverändert bleiben, im Gebiet $\overline{12}$ (an der Anode) um 75% steigen, im Gebiet 45 (an der Kathode) um 75% abnehmen. Waren die Widerstände der einzelnen Flüssigkeitssäulen vor dem Stromdurchgang sämtlich gleich r, im ganzen mithin $4\,r$, so betragen die Widerstände (von der Anode angefangen) nunmehr $\frac{r}{1{,}75} = 0{,}57\,r$; r; r; $4\,r$; im ganzen also $6{,}57\,r$ oder das 1,64fache des Anfangswertes.

Fall b. Wird in der vorher betrachteten Anordnung als Elektrolyt an Stelle der Schwefelsäure Kalilauge (KOH) in verdünnter Lösung untersucht, so hat man nach der Darstellung b in Bild 28 folgendes zu erwarten. Das Kation K regeneriert sich an der Kathode unter Wasseraufnahme zu KOH, wobei gasförmiger Wasserstoff abgeschieden wird. An der Anode entsteht aus dem Anion OH Wasser und gasförmiger Sauerstoff ($4\,OH = 2\,H_2O + O_2$). Als Folge des Stromdurchgangs wird die Ionendichte an der Kathode erhöht, an der Anode verringert. Die Verhältnisse liegen somit gerade umgekehrt wie im vorher betrachteten Fall a. Das Nähere ergibt sich aus der Zahlentafel 9.

Zahlentafel 9. (Kalilauge.)

t	ϑ	i	λ^{+}_{12}	λ_{23}	λ_{34}	λ^{-}_{45}	R
0	16,4	41,2	100	100	100	100	0,339
1h 12m	16,2	38,9	69	96	97	134	0,362
4h 41m	16,2	39,9	60	91	99	142	0,379
22h 30m	14,1	39,4	62	82	99	173	0,376

Auch hier hat man infolge der ungleichförmigen Ionenverteilung einen höheren Widerstand als zu Anfang.

[1]) Die Verdünnung betrug, ebenso wie bei den in den Zahlentafeln 9 und 10 niedergelegten Versuchen, $V = 10\,000$; d. h. die Lösung enthielt ein Grammäquivalent des Elektrolyts in 10000 Litern.

Digitized by Google

Fall c. Ein anderes Bild ergibt sich für eine Lösung von schwefelsaurem Kali (K_2SO_4). Gemäß der Darstellung c in Bild 28 wird K_2 zur Kathode, SO_4 zur Anode hingetrieben; K_2 bildet mit dem Lösungswasser unter Wasserstoffabscheidung KOH; aus SO_4 entsteht unter Sauerstoffentwicklung H_2SO_4. Nun ist das Leitungsvermögen sowohl von KOH, als auch von H_2SO_4 größer als dasjenige des ursprünglichen Elektrolyten K_2SO_4. Daher muß die Leitfähigkeit an beiden Elektroden zunehmen, und der Gesamtwiderstand nimmt ab. Das Nähere geht aus den in der Zahlentafel 10 angegebenen Versuchsergebnissen hervor.

Zahlentafel 10. (Schwefelsaures Kali.)

t	ϑ	i	λ^+_{12}	λ_{23}	λ_{34}	λ^-_{45}	R
0	18,4	58	100	100	100	100	0,256
1h 44m	19,5	84	238	175	116	108	0,178
4h 15m	18,6	123	400	267	126	192	0,125
23h	14,3	143	450	294	164	291	0,097
			Strom geöffnet				
4h 55m	16,2	122	494	237	133	258	0,114
21h 30m	15,4	93	358	177	110	144	0,158
47h	19,8	94	247	229	121	145	0,151
68h 30m	18	81	213	178	110	129	0,174
95h 50m	18	77	166	155	106	127	0,191
141h 30m	17,5	68	134	126	103	113	0,217
214h 40m	15,8	58	106	102	94	104	0,253

Nach dem Ausschalten des Stromes breiten sich die an den Elektroden gebildeten neuen Elektrolyten KOH und H_2SO_4 durch Diffusion allmählich über das ganze Flüssigkeitsvolum aus und vereinigen sich beim Zusammentreffen wieder zu K_2SO_4, so daß schließlich der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt wird. Der Ablauf dieser Erscheinung ist aus dem zweiten Teil der Zahlentafel 10 sehr schön ersichtlich.

Die Bedeutung der drei soeben betrachteten Beispiele a, b, c liegt darin, daß jedes von ihnen einen einfachen und typischen Fall der elektrolytischen Leitung darstellt, und daß sich analoge Verhältnisse auch bei flüssigen Isolierstoffen vorfinden, wie im folgenden gezeigt werden wird. Damit soll natürlich nicht gesagt sein, daß die Stromleitung in flüssigen Isolatoren stets nach dem Schema a, b oder c erfolge. Vielmehr beobachtet man auch oft sehr viel verwickeltere Verhältnisse, wie sie zu erwarten sind, falls sich mehrere verschiedene Elektrolyte an der Stromleitung beteiligen.

16. Untersuchungen über die Stromleitung in schlecht leitenden Flüssigkeiten. Versuch a. In der in Abb. 28 dargestellten Anordnung wurde Anilin untersucht, das aus dem käuflichen Rohanilin durch Destillieren bereitet worden war. Seine Leitfähigkeit[1]) betrug

[1]) Man vergleiche hierzu die in der Zahlentafel 1 für andere gangbare Stoffe angegebenen Werte.

Digitized by Google

etwa $\lambda = 1200 \cdot 10^{-15} \cdot (\Omega\,\mathrm{cm})^{-1}$. Es ergaben sich die in der Zahlentafel 11 angeführten Werte (Meßspannung 1200 V.).

Zahlentafel 11. (Anilin).

t	Θ	i	λ^{+}_{12}	λ_{23}	λ_{34}	λ^{-}_{45}	R
0	12,5	6,10	100	100	100	100	191
1h 1m	12,8	5,52	112	98	80	66	226
2h 57m	12,5	3,42	116	80	34	35	387
4h 7m	12,4	3,11	132	59	34	34	409
5h 11m	12,4	3,04	139	56	34	33	420
21h	11,7	1,88	101	33	20	21	679

Die Werte lehren, daß sich das Anilin in bezug auf die Stromleitung ähnlich verhält, wie stark verdünnte Schwefelsäure (Zahlentafel 8). Infolge des Stromdurchgangs nimmt die Leitfähigkeit in der Umgebung der Anode zu, in der Umgebung der Kathode ab; der Gesamtwiderstand R wächst allmählich auf mehr als das Dreifache des ursprünglichen Wertes.

Versuch b. Ein anderes Verhalten zeigt eine Xylolanilinmischung mit 45,5 cm³ Anilin in 100 cm³ und mit einer Leitfähigkeit von rd $\lambda = 375 \cdot 10^{-15}\,(\Omega\,\mathrm{cm})^{-1}$.

Zahlentafel 12. (Xylolanilin).

t	Θ	i	λ_{12}	λ_{23}	λ_{34}	λ^{-}_{45}	R
0	13	0,356	100	100	100	100	3360
42m	13	0,294	59	78	103	124	4270
3h 5m	12,7	0,226	53	52	68	115	5300
6h 16m	12,5	0,219	46	46	79	141	5470
21h 34m	11,8	0,191	49	46	65	148	5560
			Strom geöffnet				
2h 7m	12,2	0,228	57	60	86	185	4410
6h 35m	12,9	0,262	74	85	111	127	3590
24h 40m	12,6	0,395	96	109	134	133	2930

Hier nimmt infolge des Stromdurchganges die Leitfähigkeit an der Anode ab, an der Kathode zu. Wiederum erstreckt sich die Veränderung des Leitvermögens mit der Zeit weiter und weiter in das Innere hinein; der Gesamtwiderstand steigt mehr und mehr an. Nach dem Öffnen des Stromes nähert sich das Leitungsvermögen allmählich wieder den Anfangswerten.

Der Vergleich der Zahlentafeln 12 und 9 lehrt, daß die Stromleitung im Xylolanilin ähnlich vor sich geht, wie in stark verdünnter Kalilauge.

Versuch c. Bemerkenswert sind auch die in Zahlentafel 13 ausgeführten Messungen an destilliertem Wasser. Die Leitfähigkeit betrug $7 \cdot 10^{-10}$, lag also in der Größenordnung von Fiber und Elfenbein (vgl. Zahlentafel 1).

Digitized by Google

Zahlentafel 13. (Destilliertes Wasser).

t	Θ	i	λ_{12}^-	λ_{23}	λ_{34}	λ_{45}^+	R
0	17,5	25,0	100	100	100	100	0,605
3h 10m	18,7	30,4	180	105	94	134	0,503
4h 36m	17,1	35,4	248	196	—	137	—
20h 50m	17,1	45,8	418	179	99	239	0,339
			Strom geöffnet				
23h 30m	14,6	26,2	108	107	103	96	0,585

Das Leitvermögen nimmt an beiden Elektroden zu, so daß der Gesamtwiderstand sinken muß. Die Zahlenwerte der Zahlentafel 13 zeigen denselben Gang wie die Werte in der Zahlentafel 10; die in dem destillierten Wasser noch enthaltenen Ionen verhalten sich demnach elektrolytisch wie K_2SO_4.

Versuch d. Es ist nicht bekannt, welchen Substanzen die in den Versuchen a bis c gemessenen Flüssigkeiten ihre Leitfähigkeit verdanken. Zur weiteren Prüfung der Vorstellung, daß die Leitung in flüssigen Isolatoren elektrolytischer Natur sei, untersuchte Warburg eine sehr verdünnte Lösung eines bekannten Elektrolyten im Anilin. Von dieser Lösung mußte verlangt werden, daß ihre Leitfähigkeit überwiegend von jenem bekannten Elektrolyten herrührt. Als geeignet wurde Methylenblau $[(C_{16}H_{18}N_3S)Cl + 3H_2O]$ befunden, dessen Verwendung noch den Vorteil bietet, daß man die elektrolytische Wanderung des gelösten Stoffes an der Verfärbung der Flüssigkeit mit dem Auge verfolgen kann. Benutzt wurde eine Lösung mit dem Verdünnungsgrad 100000, entsprechend 367,4 g Methylenblau (1 Grammolekül) auf 100000 Liter Anilin. Die Leitfähigkeit der Lösung betrug $6580 \cdot 10^{-15}$, diejenige des reinen Anilins $914 \cdot 10^{-15}$; die Bedingung, daß die Leitfähigkeit überwiegend von dem gelösten Elektrolyten herrühren soll, war demnach erfüllt. Die in der Zahlentafel 14 angegebenen Werte wurden mit einer Meßspannung 1200 V. erhalten.

Zahlentafel 14. (Methylenblau in Anilin).

t	Θ	i	λ_{12}^+	λ_{23}	λ_{34}	λ_{45}^-
0	16,5	49,7	100	100	100	100
1h 9m	16,1	30	43	67	65	83
4h 20m	15,8	23,3	34	34	55	86

Die bei diesem Versuch noch gemachten Beobachtungen führen wir wörtlich an:

„Die Lösung war ursprünglich grünlich-blau. 24 Minuten nach Stromschluß hatte sich an der Anode ein 3 mm dicker farbloser Hof gebildet, auf 1 cm Entfernung von der Anode war die Flüssigkeit gelblich geworden. 1h 19m nach Stromschluß war die Entfärbung bis

Digitized by Google

auf 4 cm, nach einer weiteren halben Stunde bis auf 7 cm von der Anode fortgeschritten. Die gefundenen Widerstandsänderungen entsprechen diesen Beobachtungen insofern, als durch den Strom der Widerstand der an der Anode liegenden Abteilung am meisten, der Widerstand der an der Kathode liegenden nur verhältnismäßig wenig gesteigert wird."

Das Methylenblau wandert von der Anode weg zur Kathode hin und reichert sich dort an. Befindet sich hinter der Kathode noch ein stromfreies Flüssigkeitsvolum, so diffundiert der Farbstoff aus dem Raum vor der Kathode allmählich in den hinteren stromfreien Raum hinein, was man daran erkennt, daß sich hier die Flüssigkeit intensiv blau färbt. Zugleich verschwindet der Farbstoff mehr und mehr aus der Strombahn, deren Widerstand entsprechend wächst.

Bereits H. Hertz[1]) hatte gefunden, daß der Widerstand von Benzin beim Stromdurchgang stark zunimmt und diese Erscheinung als „elektrische Reinigung" bezeichnet. Die Versuche Warburgs lassen als Ursache davon die Ionenverschiebung erkennen, und sie lehren ferner, daß die „elektrische Reinigung" nur so lange vorhält, als Strom fließt, und daß sich nach dem Aufhören des Stromes der ursprüngliche Zustand allmählich wieder einstellt.

17. Die Leitfähigkeit für Wechselstrom. Nach den vorher angeführten Versuchen ändert sich die Verteilung der Ionen in der Flüssigkeit während des Stromdurchganges, bis sich, bei konstant gehaltener Spannung an den Elektroden, endlich ein stationärer Zustand einstellt. In der Regel ist hierbei die Leitfähigkeit erheblich geringer, als zu Anfang des Versuches. Ist die Spannung an den Elektroden nicht konstant, sondern sinusförmig veränderlich, so kann die Ionenverteilung den Spannungsänderungen um so weniger folgen, je höher die Frequenz ist. Die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen ist so gering, daß bereits bei den niedrigsten technisch verwendeten Frequenzen (16 in der Sekunde) der Wechselstrom keine nennenswerte Änderung der Ionenverteilung mehr hervorruft. Dies bedeutet, daß die Leitfähigkeit der flüssigen Isolierstoffe für die Wechselströme der Technik gleich dem Anfangswert der Leitfähigkeit für Gleichstrom zu setzen und jedenfalls von der Frequenz unabhängig ist. Diese Folgerung der im Vorhergehenden vertretenen theoretischen Anschauungen ist durch die Versuche von L. Pungs[2]), G. L. Addenbrooke[3]) und F. Tank[4]) vollauf bestätigt worden. Insbesondere hat

[1]) Ann. d. Phys. (3), Bd. 20 (1883), S. 283.

[2]) L. Pungs, Arch. f. Elektrot., Bd. 1 (1912), S. 329.

[3]) G. L. Addenbrooke, Proc. of the Phys. Soc. of London, Bd. 27 (1915), S. 291.

[4]) F. Tank, Ann. d. Phys. (4), Bd. 48 (1915), S. 307.

Digitized by Google

L. Pungs nachgewiesen, daß der Energieverbrauch in flüssigen Isolierstoffen in dem Frequenzgebiet $f = 15$ bis 75 unabhängig von der Frequenz ist, während Addenbrooke gezeigt hat, daß die höhere Leitfähigkeit für raschen Wechselstrom stetig in den niedrigeren Gleichstromwert übergeht, wenn man zu sehr niedrigen Frequenzen hinabsteigt. Zwei bemerkenswerte Versuchsreihen sind in der Zahlentafel 15 aufgeführt; die eine betrifft Mineralöl, die andere feuchtes Löschpapier, das seine Leitfähigkeit der darin enthaltenen Feuchtigkeit verdankt.

Zahlentafel 15. Leitfähigkeit für Wechselstrom.

Frequenz f	Leitfähigkeit in $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$	
	Mineralöl	feuchtes Löschpapier
0	$4{,}2 \cdot 10^{-12}$	$0{,}77 \cdot 10^{-9}$
0,5 per/sec	11	1,00
1 „ „	11,5	1,025
2 „ „	12,5	1,035
4 „ „	13,2	1,055
8 „ „	13,6	1,07
16 „ „	13,9	1,10
25 „ „	14,6	1,12
40 „ „	15,4	1,15

18. Flüssigkeitsströmungen infolge ungleicher Verteilung der Leitfähigkeit. Nach den Ausführungen in den Abschnitten 15 und 16 bilden sich in der ursprünglich homogenen Flüssigkeit wegen der Ionenverschiebung beim Stromdurchgang Gebiete von verschiedener Leitfähigkeit aus. Warburg hat gezeigt, daß diese elektrische Heterogenität die Strömungen in der Flüssigkeit hervorruft, die wohl jedem Experimentator auffallen, der Versuche mit flüssigen Isolierstoffen, insbesondere bei erhöhter Spannung, ausführt.

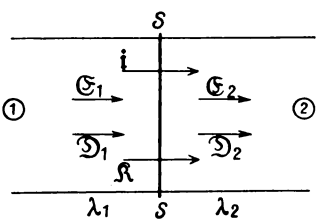


Abb. 29. Zur Erklärung der Flüssigkeitsströmungen im elektrischen Felde.

In der Ebene SS Abb. 29 mögen zwei Flüssigkeitsgebiete 1 und 2 zusammenstoßen, von denen das linke die Leitfähigkeit λ_1, das rechte die Leitfähigkeit λ_2 besitzt. Bei der Stromdichte i ist die Feldstärke

$$\text{links: } \mathfrak{E}_1 = \frac{i}{\lambda_1}, \quad \text{rechts: } \mathfrak{E}_2 = \frac{i}{\lambda_2};$$

die dielektrische Verschiebung

$$\text{links: } \mathfrak{D}_1 = \frac{\varepsilon}{\gamma} \cdot \frac{i}{\lambda_1}, \quad \text{rechts: } \mathfrak{D}_2 = \frac{\varepsilon}{\gamma} \cdot \frac{i}{\lambda_2}.$$

Digitized by Google

Die Trennebene SS trägt mithin eine positive elektrische Ladung von der Dichte

$$q = \mathfrak{D}_2 - \mathfrak{D}_1 = \frac{\varepsilon}{\gamma} i \left[\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right].$$

An dieser Ladung greift links die Feldstärke $\mathfrak{E}_1$, rechts die Feldstärke $\mathfrak{E}_2$ an; sie erfährt daher eine Kraft

$$\mathfrak{K} = q \frac{\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2}{2} = i \frac{\varepsilon}{\gamma} \left[\frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_1}\right] \cdot \frac{\mathfrak{E}_1 + \mathfrak{E}_2}{2},$$

$$\mathfrak{K} = \frac{i^2}{2} \frac{\varepsilon}{\gamma} \left[\frac{1}{\lambda_2^2} - \frac{1}{\lambda_1^2}\right] = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\gamma} (\mathfrak{E}_2^2 - \mathfrak{E}_1^2).$$

Unter dem Einfluß der Kraft $\mathfrak{K}$ verschiebt sich die Trennebene SS nach dem Gebiet kleinerer Leitfähigkeit[1]).

Die vorstehenden Gleichungen drücken folgenden physikalischen Sachverhalt aus: Ist die Leitfähigkeit in einem Stoff nicht überall dieselbe, so bilden sich dort, wo sich die Leitfähigkeit räumlich ändert, elektrische Ladungen im Innern des Stoffes. Auf diese Ladungen übt das elektrische Feld Kräfte aus, die dem Quadrat des Stromes (oder der Spannung) proportional sind und die nach dem Ort niedrigerer Leitfähigkeit gerichtet sind. Die Ladungen haften an dem Stoff; ist dieser eine Flüssigkeit, so strömt dieselbe unter dem Einfluß der Kräfte von den Gebieten höherer Leitfähigkeit nach den Gebieten niederer Leitfähigkeit. Die Strömung bewirkt eine Durchmischung der Flüssigkeit, welche den durch den elektrischen Strom erzeugten Konzentrationsänderungen entgegenwirkt.

Bemerkenswert ist nun noch folgendes: Die Konzentrationsverschiebungen sind der Stromdichte proportional; die Kräfte $\mathfrak{K}$ wachsen aber mit dem Quadrat der Stromdichte, und die von den Kräften $\mathfrak{K}$ hervorgerufenen Flüssigkeitsströmungen hängen nach irgendeinem verwickelten Gesetz von den $\mathfrak{K}$ ab. Hieraus ergeben sich scheinbare Abweichungen vom Ohmschen Gesetz insofern, als die Stromdichte nicht proportional der auf die Elektroden wirkenden Spannung wird. Diese Erscheinung beruht natürlich auf der mit der Stromdichte veränderlichen Beschaffenheit des Elektrolyten.

Auch ohne jede Flüssigkeitsströmung ändert sich die Beschaffenheit des Elektrolyten infolge des Stromdurchgangs, weshalb überhaupt das Ohmsche Gesetz für flüssige Isolierstoffe bei Gleichstrom nicht gilt.

Dagegen gilt das Ohmsche Gesetz für Wechselstrom, weil dieser keine nennenswerten Konzentrationsänderungen zur Folge hat.

---

[1]) $\mathfrak{K}$ ist positiv, hat also die in Abb. 29 eingezeichnete Richtung, wenn $\lambda_2 < \lambda_1$ ist.

Digitized by Google

19. Hochisolierende Flüssigkeiten. Ionisierung durch Strahlung. In den vorhergehenden Abschnitten ist dargelegt worden, daß die Stromleitung in flüssigen Isolierstoffen im wesentlichen elektrolytischer Natur ist. Beruht sie insbesondere darauf, daß irgendwelche fremden Elektrolyte in geringer Menge (als Verunreinigungen) in der Flüssigkeit gelöst oder ihr beigemischt sind, so muß sich die Leitfähigkeit durch sorgfältige Reinigung des Isolierstoffes weitgehend herabsetzen lassen. Es fragt sich, ob es auf diesem Wege möglich ist, die Isolationsfähigkeit eines flüssigen Isolierstoffes beliebig hochzutreiben. Bei vielen Stoffen gelingt die Reinigung nur bis zu einem gewissen Grade; die übrig bleibende Leitfähigkeit besitzt immer noch Kennzeichen ihrer elektrolytischen Natur. Dagegen ist es G. Jaffé[1]) gelungen, einige an sich sehr schlecht leitende Flüssigkeiten (Hexan, Heptan, Petroläther) durch vielfach wiederholtes sehr sorgfältiges Destillieren von den elektrolytisch leitenden Verunreinigungen so gut wie vollständig zu befreien. Die so behandelten Flüssigkeiten wiesen noch einen Rest von Leitfähigkeit auf, die sich in jeder Weise so verhielt, wie die Leitfähigkeit eines dichten Gases. Sie kann beschrieben werden durch die Annahme, daß die Flüssigkeit durch irgendeine Strahlungsquelle in geringem Maße ionisiert wird. Durch die Strahlung wird in der Zeiteinheit eine gewisse Zahl von Molekülen in Ionen zerspalten. Die Zahl der in 1 cm^3 und in 1 Sekunde erzeugten Ionen werde mit n bezeichnet. n ist als Maß für die auf der Strahlung beruhende Leitfähigkeit des Stoffes anzusehen. Bei kleinen Feldstärken befolgt die Stromleitung das Ohmsche Gesetz. Bei größeren Feldstärken nähert sich der Strom einem Sättigungswert, der gleich ne ist, wo e die Ladung des Ions (die Elementarladung) bedeutet ($e = 1{,}08 \cdot 10^{-19}$ Coulomb). Sättigung tritt ein, sobald die Zahl der durch das elektrische Feld auf den Elektroden niedergeschlagenen Ionen gleich der Zahl der Ionen ist, welche die Strahlung in der Flüssigkeit neu erzeugt. Bei weiterer Steigerung des Feldes kann der Strom nicht mehr anwachsen. Im Gegensatz zu den früher betrachteten Fällen ist die Leitfähigkeit hier von der Temperatur unabhängig.

Bei den Versuchen von Jaffé waren die Ströme bereits bei einer Feldstärke von 200 V/cm (entsprechend einer Spannung von 400 V. zwischen den Elektroden) gesättigt. Heptan und Petroläther ergaben nahezu denselben Grenzwert der Leitfähigkeit wie gereinigtes Hexan.

Die die Ionisation hervorrufende Strahlung ist teils äußere, teils rührt sie von der Apparatur (insbesondere von den Gefäßwänden) her. Die äußere Strahlung läßt sich dadurch verringern, daß man das Meßgefäß mit einem starken Bleimantel umgibt. Die Wandstrahlung hängt

[1]) G. Jaffé, Ann. d. Phys. (4), Bd. 28 (1909), S. 326.

Digitized by Google

ab vom Material der Wand. Das Ergebnis eines solchen Versuches zeigt die Zahlentafel 16, aus welcher außerdem auch die Erscheinung der Sättigung ersichtlich ist. Der Bleischirm war 30 mm stark.

Zahlentafel 16. Leitfähigkeit des gereinigten Hexans (Probe III), ausgedrückt durch die Zahl der in 1 cm^3 und 1 sec entstehenden Ionen.

Spannung in Volt	+ 400	+ 800	+ 1200	+ 1600	+ 2000
ohne Bleimantel	217	220	220	217	222
mit Bleimantel.	103	105	103	106	105

Aus diesem Versuch und aus anderen Messungen hat sich ergeben, daß die äußere Strahlung den Charakter einer ziemlich homogenen γ-Strahlung mit dem Absorptionskoeffizienten 0,46 cm^{-1} für Blei besitzt; ein Bleischirm von 3 cm Stärke läßt immer noch 25% der äußeren Strahlung hindurch ($e^{-3 \cdot 0{,}46} = e^{-1{,}38} = 0{,}25$). Dabei geht die Leitfähigkeit auf die Hälfte zurück.

Die von den Apparatteilen ausgehende Strahlung scheint vorwiegend aus β-Strahlen (schnell bewegten Elektronen) zu bestehen. Da die Gefäßwand den einen Pol bildet, wird die von ihr ausgehende β-Strahlung durch ein positives Potential der Wand zurückgehalten; daher erscheint die Leitfähigkeit der Flüssigkeit in diesem Fall geringer als mit umgekehrter Polarität. Diese Tatsache wird durch die Zahlenwerte der Zahlentafel 17 veranschaulicht; außerdem zeigen die Werte die Unabhängigkeit der auf Ionisierung beruhenden Leitfähigkeit von der Temperatur.

Zahlentafel 17. Einfluß der Polarität der Gefäßwand und der Temperatur auf die Leitfähigkeit (gereinigtes Hexan, Probe II).

ϑ	+ 400 V.	− 400 V.	− 800 V.
20,5	183	271	271
30,4	184	264	269
40,4	185	267	259

Durch eine Reihe weiterer Versuche wurde die von der Wandstrahlung allein herrührende Leitfähigkeit bestimmt. Die Wandstrahlung ist abhängig von dem Material der Wand (Zahlentafel 18), was zu erwarten war.

Zahlentafel 18. Der von der Strahlung der Gefäßwände herrührende Anteil der Leitfähigkeit von Petroläther.

Stoff	λ_w
Messing	77
Kupfer	93
Aluminium	31
Silber	88
Platin	47

Digitized by Google

Die von der natürlichen Strahlung durch Ionisierung hervorgebrachte Leitfähigkeit ist immer sehr gering. Man muß schon, wie es Jaffé getan hat, sehr schlecht leitende Stoffe verwenden und diese noch besonders reinigen, wenn man die Strahlungsleitfähigkeit rein beobachten will. Unter gewöhnlichen Verhältnissen überwiegt die von anderen Ursachen herrührende Leitfähigkeit bei weitem; aber bei einigen schlecht leitenden Stoffen kommt die Strahlungsleitfähigkeit neben anderen Arten der Leitfähigkeit in Betracht, so daß die beobachtete Gesamtleitfähigkeit ein verwickeltes Verhalten zeigt. An derartigen Stoffen kann man die Strahlungsleitfähigkeit dadurch hervortreten lassen, daß man eine stärkere Bestrahlung hinzufügt. Zahlentafel 19 enthält das Ergebnis eines von Jaffé ausgeführten Versuches mit einer Flüssigkeit, die nicht völlig rein war; ihre Leitfähigkeit war noch zu $^1/_5$ elektrolytischer Natur.

Zahlentafel 19. Leitfähigkeit einer nicht ganz reinen Flüssigkeit mit künstlicher Bestrahlung.

Temp.	+ 400 V.	+ 800 V.
20	$3{,}02 \cdot 10^{-4}$	$3{,}02 \cdot 10^{-4}$
30	3,08	3,16
40	3,16	3,13

Ein Maß für die Stärke der zusätzlichen Bestrahlung ist die Angabe, daß der Isolationsstrom dabei auf etwa den 100fachen Wert steigt (rd 30000 Ionen/sec · cm³). Der Umstand, daß der Strom praktisch gesättigt ist, läßt erkennen, daß die Leitfähigkeit ganz überwiegend von der Strahlung herrührt. Das Vorhandensein eines geringen elektrolytischen Anteils kommt noch in dem Anwachsen der Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zum Ausdruck.

Versuche mit noch stärkerer Bestrahlung sind von Hodgson beschrieben (Vgl. Abschnitt 13). Die Messungen, die der Genannte an Paraffinöl und an anderen flüssigen und festen Isolierstoffen ausgeführt hat, schließen sich in ihren Ergebnissen durchaus an die von Jaffé an.

Bemerkenswert ist vor allem, daß die Strahlungsionisierung auch bei festen Stoffen auftritt; man kann nach diesen Versuchen erwarten, daß auch bei sehr reinen, festen Isolierstoffen eine gewisse Strahlungsleitfähigkeit übrig bleiben würde, falls es gelänge, die von anderen Ursachen herrührende Leitfähigkeit vollständig zu beseitigen.

Digitized by Google

II. Natürliche Isolierstoffe, Marmor, Schiefer, Asbest, Holz.

Von K. Geisler.

Außer dem Glimmer, der im nächsten Beitrag dieses Buches besprochen ist, kommen von den natürlichen Isolierstoffen Marmor und Schiefer, in geringerer Menge Serpentin, ferner Asbest und schließlich noch Holz in Frage.

Die übrigen natürlichen Stoffe, wie Kautschuk, Guttapercha und Balata möchte ich hier nur erwähnen, da hierüber in einem der folgenden Beiträge ausführlicher berichtet werden wird.

1. Marmor.

Wenden wir uns zunächst dem Marmor zu, so tritt uns hier eine überwältigende Fülle verschiedener Sorten entgegen. Im geologischen Sinne ist Marmor ein kristallinisch-körniges Aggregat von Kalkspat (kohlensaurer Kalk); also ein reines Sedimentgestein, welches sich aber häufig in der Nähe von Eruptivgestein findet. Sie erinnern sich noch sicherlich des letzten Erdbebens in Oberitalien, im Sommer des Jahres 1920, das besonders die Nähe der weltberühmten Marmorbrüche von Carrara heimsuchte und durch die Bildung eines kleinen Vulkans die Anwesenheit von Eruptivgestein in der dortigen Gegend anzeigte. Auch in Deutschland treten an einzelnen Stellen, wo erloschene Vulkane vorhanden sind, wie in der Eifel und an der Lahn Marmorlager auf. Wird unter Marmor im Sinne des Geologen und Chemikers reiner kohlensaurer Kalk $CaCO_3$ verstanden, so werden in der Technik schlechthin alle Kalksteine, die schön gefärbt und polierbar sind, als Marmor angesprochen.

Bekanntlich wurde Marmor schon im Altertum viel verwendet und die Künstler von Hellas und Rom haben sich zur Herstellung ihrer zum Teil bis auf den heutigen Tag erhaltenen Kunstdenkmäler der verschiedenen Marmorsorten, die sich in ihren Ländern fanden, bedient.

Von den unzähligen Marmorsorten, die es auf der Erde gibt, möchte ich aber nur diejenigen herausgreifen, welche für die Elektrotechnik, und zwar besonders für Deutschland wichtig geworden sind. Es sind dies der italienische und der deutsche Marmor.

Der italienische Marmor, hauptsächlich aus den Brüchen von Carrara stammend, ist wegen seiner schönen weißen Farbe unter der

Digitized by Google

Handelsmarke „blanc clair" sehr beliebt. Einzelne Sorten haben eine mehr bläuliche Färbung, die unter dem Namen „bleu moderne" ihre Liebhaber finden.

In Deutschland findet sich Marmor im Fränkischen Jura, im Fichtelgebirge, in Schlesien, an der Lahn sowie an vielen anderen Orten.

Der Jura Marmor, der auch unter dem Namen Treuchtlinger Marmor oder Bayerischer Marmor bekannt ist, hat eine gelbbraune Färbung und lebhafte Marmorierung.

Von den schlesischen Marmorbrüchen kommen hauptsächlich die von Wolmsdorf, die einen weißen Marmor liefern, und die von Groß-Kunzendorf, deren Gestein rötliche bis graublaue Färbung aufweist, in Frage. Diese Sorten zeigen nicht die lebhafte Äderung, wie der italienische Marmor, sondern haben ein mehr geflammtes Aussehen. Es gibt aber auch deutsche Marmorsorten mit lebhaften Farben und Adern, z. B. die von der Lahn stammenden. Die übrigen, sonst noch in Deutschland vorkommenden Marmorsorten kommen für elektrotechnische Zwecke nicht in Frage; ich möchte sie daher an dieser Stelle übergehen.

Der Marmor gelangt aus den Brüchen, die bekanntlich im Tagebau betrieben werden, in Blöcken, welche die Abmessungen von etwa $3{,}5 \times 1{,}8 \times 1{,}5$ m aufweisen und ein Gewicht von rund 25 t besitzen, zum Marmorwerk. Hier werden die Blöcke in einem Sägegatter mittels Stahlsägeblätter, welche aber keine Zähne besitzen, unter Zugabe von Quarzsand in Platten von 20—50 mm Stärke zersägt. Darauf werden die Platten auf die erforderliche Breite geschnitten und die Kanten meistens unter Verwendung von Fräsmaschinen geglättet. Die Oberfläche der Platten wird nunmehr auf Schleifmaschinen zunächst mit Karborundum, später mit Bimsstein und anderen Schleifmitteln glatt geschliffen und schließlich mit Schmirgel, Tripel und Zinnasche hochglänzend poliert. Die Kanten werden je nach Bedarf unbearbeitet gelassen oder abgerundet bzw. fazettiert. Diese Arbeit wird gewöhnlich von Hand ausgeführt. In diesem Zustand kommen die Platten an die Elektrofirmen, welche die weitere Behandlung, wie das Bohren und Ausschneiden von Löchern übernehmen.

Da der Marmor bekanntlich hygroskopisch ist (seine Feuchtigkeitsaufnahme nach 24-stündigem Liegen unter Wasser beträgt bis etwa $^1/_2$ %), werden die Rückseite der Platten sowie die Bohrungen mit einem ölhaltigen Lack gestrichen, um das Aufsaugen von Feuchtigkeit zu verhindern. Für besondere Zwecke können die Platten auch völlig mit einer ölhaltigen Substanz imprägniert werden, womit gleichzeitig eine Schwarzfärbung des Marmors verbunden werden kann.

Ferner ist es notwendig, da der Marmor hin und wieder leitende Adern aufweist, jede einzelne Platte vor Ingebrauchnahme durch Iso-

Digitized by Google

lationsmessungen auf das Vorhandensein solcher Adern abzutasten. Im allgemeinen wird diese Prüfung schon von den Marmorwerken vorgenommen, welche die Bedürfnisse der Elektroindustrie genau kennen und die geeigneten Platten daraufhin aussuchen. Der Isolationswiderstand des Marmors schwankt innerhalb der verschiedenen Sorten ganz beträchtlich. Jeder, der einmal selbst Isolationsmessungen vorgenommen hat, weiß, daß diese außerordentlich von der Luftfeuchtigkeit, der Beschaffenheit der Meßeinrichtung und nicht zuletzt von der Sorgfältigkeit des die Messung Ausführenden abhängig sind. Unterschiede der Meßresultate von mehreren hundert Prozent sind keine Seltenheit. Zahlen hierfür anzugeben, erscheint deswegen nicht zweckmäßig.

Für den Oberflächenwiderstand in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit ergab eine Untersuchung folgendes:

Oberflächenwiderstand und Feuchtigkeitsaufnahme von Marmor. Widerstand einer Fläche von 1 cm Länge und 10 cm Breite bei 1000 V. Gleichspannung.

	Oberflächenwiderstand (Vergleichszahl)			Gewichtsveränderung	
	nach läng. Liegen an der Luft	nach Trocknen	nach 24stünd. Liegen in Wasser u. 2 stünd. Liegen an der Luft	durch das Trocknen	durch das Liegen im Wasser
Italienisch. Marmor	4	5	2—3	unter −0,1%	unter +0,1%
Deutscher Marmor	3	5	2	−0,1%	+0,6%

Die Vergleichszahlen bedeuten:

Vergleichszahl	Oberflächenwiderstand
2	1—100 Megohm
3	100—10000 „
4	10000—1 Million „
5	über 1 Million „

Über die Durchschlagsfestigkeit finden sich in der Literatur einige Angaben; da aber die näheren Umstände, unter denen die Versuche vorgenommen wurden, fast immer fehlen, so sind auch diese Zahlen belanglos. Im übrigen ist zu beachten, daß es sich beim Marmor um ein Naturprodukt handelt, für welches Normen nicht aufgestellt werden können.

Über die mechanischen Eigenschaften des Marmors ist folgendes zu sagen: Italienischer, „blanc clair“ hat bei geringeren Sorten, die

Digitized by Google

einen zuckerigen Bruch aufweisen, eine Biegefestigkeit im Mittel von 120 kg/cm², bessere Sorten haben etwa 180 kg/cm², die besten Sorten, zu denen auch „bleu moderne" gehört, 240—300 kg/cm². Deutscher Marmor ist im allgemeinen etwas weniger fest, im Mittel beträgt seine Biegefestigkeit etwa 150 kg/cm². Die Bearbeitbarkeit der verschiedenen Sorten ist im allgemeinen gut, aber nicht einheitlich. „Blanc clair" läßt sich gut bohren, sägen, fräsen und polieren. Von den deutschen Marmorsorten läßt sich der Kunzendorfer etwas schwerer bearbeiten und stumpft die Werkzeuge mehr ab.

Die Wärmebeständigkeit des Marmors ist nur eine begrenzte. Dauernde Erwärmung über 100° C macht den Marmor mit der Zeit brüchig. Dagegen ist er bei kurzzeitiger Einwirkung von Hitze, wie sie beispielsweise bei Kurzschlüssen auftreten kann, widerstandsfähig. Er ist also im Sinne der V. D. E.-Bestimmungen als feuersicher anzusprechen.

Von Säuren wird Marmor, wie jeder Kalkstein, sehr stark angegriffen, schwächer dagegen von Alkalien. Durch Öl wird er zwar nicht zerstört, aber er bekommt häßliche Fettflecke, da er das Öl teilweise aufsaugt.

Über seine Verwendung in der Elektrotechnik sagen die Errichtungsvorschriften des V.D.E. folgendes aus:

§ 5. Die nicht polierten Flächen von Steinplatten sind durch einen geeigneten Anstrich gegen Feuchtigkeit zu schützen.

In Bergwerken unter Tage sollen Steinplatten (Marmor, Schiefer u. dgl.) nur unter Öl Verwendung finden.

In Ausführung dieser Vorschriften werden sämtliche Schalttafelplatten, wie bereits vorher erwähnt, mit einem ölhaltigen Lackanstrich auf der Rückseite und in den Bohrungen versehen.

An Bord von Kriegsschiffen war Marmor stets verboten, da die Marmorplatten durch die beim Lösen der Geschütze auftretenden Erschütterungen des Schiffskörpers zerbrechen würden. Auf Handelsschiffen finden Marmorplatten für die Hauptschalttafeln noch Verwendung, dagegen werden für die kleineren Verteilungstafeln wie auf den Kriegsschiffen Blechtafeln verwendet.

Das Hauptanwendungsgebiet des Marmors bilden die Schaltanlagen in Kraftwerken. Hier kommt es darauf an, der Schaltanlage, in der sich wie im menschlichen Gehirn die einzelnen Fäden zusammenfinden, auch äußerlich ein ihrer Bedeutung entsprechendes Schmuckkleid zu geben. Es kommt aber auch noch ein weiteres psychologisches Moment hinzu; bekanntlich finden Maschinen und Apparate, welche ein sauberes, glänzendes Äußere besitzen, das sich auch leicht und bequem reinigen läßt, viel größere Pflege, als Einrichtungen, die nur schwer zugänglich und mit leicht verschmutzenden Ecken usw. versehen sind.

Digitized by Google

Es ist daher zu verstehen, daß man das Äußere der Schaltanlage, welche alle wichtigen Teile zur Bedienung des Kraftwerks und des Netzes in sich vereinigt, entsprechend ausgestaltet, um es stets sauber

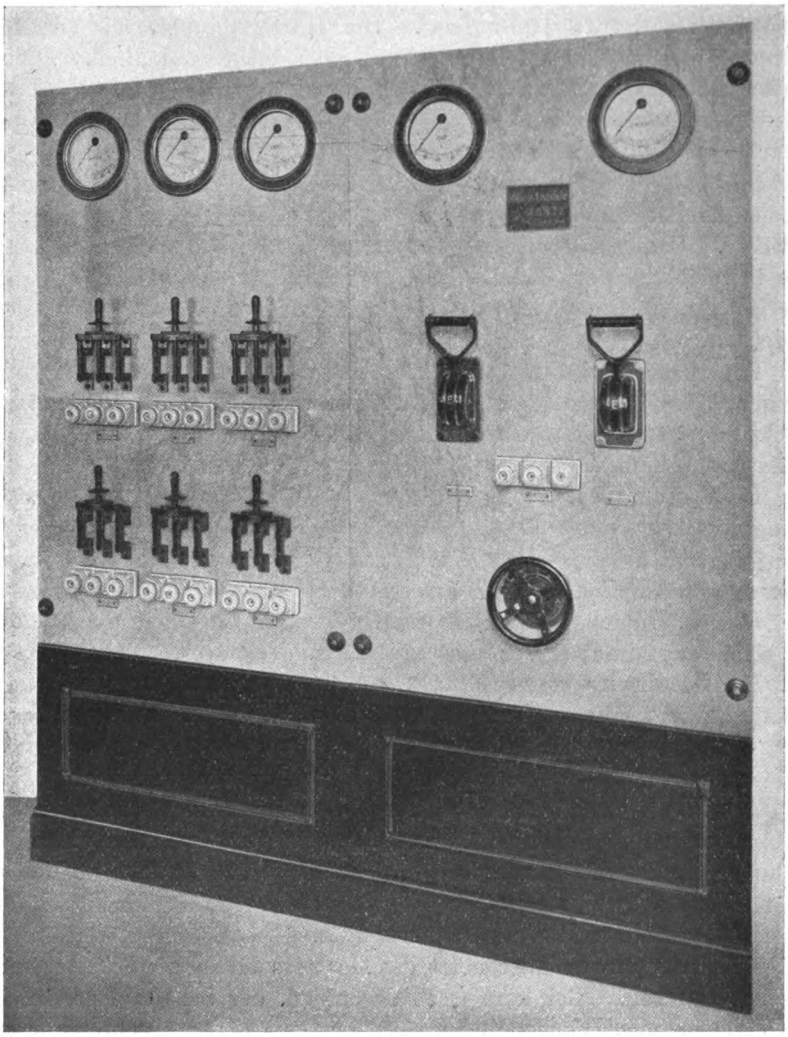


Abb. 1. Schaltanlage.

und betriebsbereit vorzufinden. Je nach dem Geschmack der jeweiligen Zeitperiode und des betreffenden Bauleiters sind nun die verschiedenartigsten Ausführungen zustande gekommen.

Ältere Ausführungen zeigen manchmal Marmorschalttafeln, die mit einer Holzverkleidung im gotischen Stil versehen sind und deren

Digitized by Google

Aufbau fast an eine Kirchenorgel erinnert, ein Eindruck, der durch die orgelpfeifenähnlichen Zellenschalter, die auf der Vorderseite der Tafeln angebracht sind, noch bestärkt wird.

Abb. 1 zeigt eine Schaltanlage, in der die Verwendung des Mar-

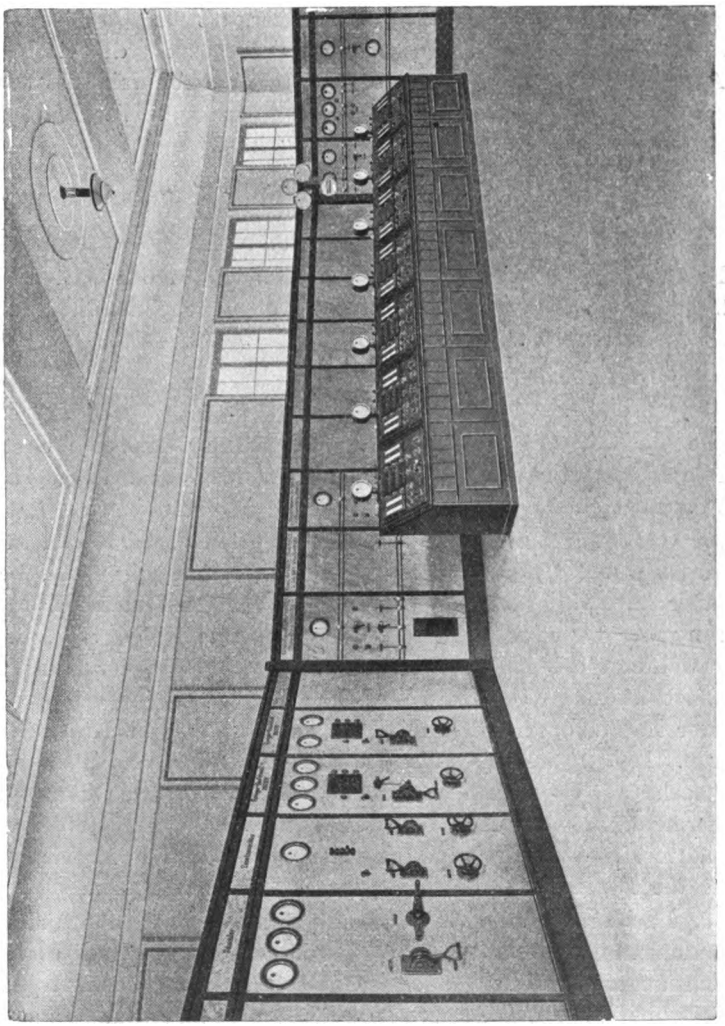


Abb. 2. Hauptschaltanlage des Murgwerkes Forbach.

mors als Isolierstoff durch die auf der Vorderseite angebrachten Hebelschalter deutlich sichtbar ist.

Abb. 2 zeigt eine moderne Schaltanlage, und zwar die Hauptschalttafel der 100000 Volt-Anlage des Murgwerks Forbach. Hier sind auf der Vorderseite der Tafeln kaum noch spannungsführende Teile

Digitized by Google

ersichtlich. Der Marmor dient hier nur als Baustoff und Träger der Meßinstrumente, der Antriebsgestänge für Schalter und der Handräder für Regler und Anlasser. Der Marmor ist in diesem Falle als Werkstoff ausschließlich des schöneren Aussehens wegen gewählt worden.

Überhaupt ist bei der Auswahl der in Frage kommenden Marmorsorten häufig weniger der Elektrotechniker, als der Architekt ausschlaggebend. Nicht zu vergessen ist allerdings auch der Geldbeutel des Auftraggebers; denn dieser wird durch die Auswahl des Schalttafelmaterials am meisten in Mitleidenschaft gezogen. Vor dem Kriege kostete italienischer Marmor „blanc clair" in

20 mm Stärke etwa ℳ 20.— pro qm
25 mm „ „ ℳ 25.— „ „
30 mm „ „ ℳ 29.50 „ „

Die Preise richteten sich also fast proportional nach der Plattenstärke. Deutscher Marmor dagegen wurde in den entsprechenden Stärken mit

ℳ 12.— ℳ 15.— ℳ 18.—

gewertet.

2. Kunstmarmor.

Ehe wir uns mit den weiteren dem Marmor ähnlichen Gesteinsarten beschäftigen, möchte ich noch einige Worte über den sogenannten Kunstmarmor einfügen.

Der Gedanke, künstlichen Marmor herzustellen, lag schon in der Vorkriegszeit bei den relativ hohen Marmorpreisen sehr nahe, besonders aber im Kriege, wo der vielbegehrte italienische Marmor infolge Sperrung der Grenzen nicht ins Land kommen konnte. Es wurde daher während des Krieges viel auf diesem Gebiete der Kunststoffe gearbeitet und es gibt heute schon eine ganze Reihe größerer und kleinerer Fabriken, die sich mit der Herstellung von Kunstmarmor befassen. In den meisten Fällen besteht der künstliche Stein in der Hauptsache aus Gips, dem gewisse Zusätze, wie Alaun, Glimmermehl, Schiefermehl, Zement usw. beigegeben sind. Manchmal finden sich auch härtere Einschlüsse, wie kleine Kieselsteine und dergleichen darin, welche die Bearbeitungsfähigkeit jedoch stark herabsetzen.

Für Bauzwecke hat sich der Kunstmarmor, da er nur für Wandverkleidungen im wesentlichen verwendet wird, bei denen es hauptsächlich auf das schöne Aussehen ankommt, im allgemeinen gut bewährt, zumal man mit der Nachahmung der dem Naturstein charakteristischen Marmorierung heutzutage sehr weit vorgeschritten ist.

Für elektrotechnische Zwecke dagegen hat sich Kunstmarmor bis jetzt nicht einführen können. Es steht ihm einmal die geringere Festigkeit entgegen, ferner, was für elektrotechnische Zwecke sehr wichtig ist, seine große Feuchtigkeitsaufnahme. Nach den mir be-

Digitized by Google

kannt gewordenen Untersuchungen beträgt die Biegefestigkeit der meisten Sorten nur etwa 45—60 kg/cm², nur einzelne Arten bringen es auf 140—160 kg/cm². Die Feuchtigkeitsaufnahme beträgt nach 24-stündiger Aufbewahrung in feuchter Luft von 90% etwa 1,5—3%, nach 24-stündiger Aufbewahrung unter Wasser von 20° C 15% und darüber.

Im Vergleich zu den natürlichen Marmorsorten verhalten sich die Preise des Kunstmarmors zum deutschen und zum italienischen Marmor etwa wie 1 : 2 : 4.

3. Belgischer Granit.

Beim Bau von Schaltanlagen treten nun häufig Fälle auf, in denen auch die Festigkeit des natürlichen Marmors, der aus wirtschaftlichen Gründen nur in bestimmten Stärken (gewöhnlich 30 mm) Anwendung findet, nicht mehr ausreicht, um schwere Apparate, wie Zellenschalter, Automaten und dergleichen an den Schalttafelwänden mit der nötigen Sicherheit anzubringen. Hierfür hat sich nun der sogenannte belgische Granit, der aber nicht, wie der echte Granit, ein eruptives Hartgestein, sondern ebenso wie der Marmor ein sedimentärer Kalkstein ist, gut bewährt. Er wird gewöhnlich in Platten von 5—10 cm Dicke verwendet. Seine Bearbeitungsfähigkeit und seine sonstigen Eigenschaften sind von denen des Marmors nicht wesentlich verschieden.

4. Solnhofer Stein.

Ein weiteres als Isolierstoff verwendetes Gestein, das dem Marmor in seiner geologischen Zusammensetzung sehr nahe verwandt ist, ist der sogenannte Solnhofer Lithographie-Stein, auch Solnhofer Marmor oder Solnhofer Schiefer genannt. Es ist ein schieferiger Jurakalk, der in Solnhofen an der Altmühl in Mittelfranken gewonnen wird. Der Stein, der, wie der Name schon sagt, früher viel zum Herstellen von Lithographien benutzt wurde (heutzutage hat er in dieser Beziehung an Bedeutung verloren, da man andere Vervielfältigungsarten kennt), ist noch durch die besonders gut erhaltenen Versteinerungen prähistorischer Tierarten weithin bekannt. Das spezifische Gewicht beträgt etwa 2,6, entspricht also dem des Marmors. Über seine Eigenschaften berichtet eine Untersuchung des Elektrischen Prüfamts 3 in München folgendes: Die Durchschlagsspannung einer 15 mm starken Platte, die zwischen zwei kreisförmigen Metallelektroden von 30 mm Durchmesser eingespannt und der Einwirkung einer Wechselspannung von 50 Perioden pro Sekunde ausgesetzt war, betrug bei langsamer Spannungssteigerung 25000 Volt. Unter der Einwirkung eines elektrischen Lichtbogens von etwa 20 mm Länge, der gegen die Oberfläche der Platte geblasen wurde, bildete sich keine leitende Brücke

Digitized by Google

im Material. Form und Festigkeitsveränderungen durch Erhitzung mit einer Benzinstichflamme traten nicht auf; lediglich zeigte sich eine rötliche Verfärbung der gelblichen Naturfarbe. Die Wasseraufnahme nach 24-stündigem Liegen im Wasser betrug durchschnittlich 1%. Von Säure wird der Lithographenstein ebenso wie der Marmor angegriffen. Nach 24-stündiger Einwirkung von Akkumulatorensäure verlor ein Probestück etwa $1^1/_2$% an Gewicht. Die Wirkung der Säure war jedoch nur an der Oberfläche erkennbar, ohne das Gefüge der Probe anzugreifen. Die Bearbeitungsfähigkeit ist eine sehr hohe. Das Material ist weicher als Marmor und läßt sich ohne besondere Mühe bohren, schleifen und polieren. Von manchen Seiten wird jedoch über eine gewisse Sprödigkeit des Steines geklagt, insbesondere sollen beim Bohren von Löchern an den Kanten der Platten diese leicht ausspringen. Das Anwendungsgebiet des Solnhofer Steines als elektrischer Isolierstoff ist, da er absolut frei von metallischen Adern ist, ziemlich umfangreich. Hauptsächlich findet er in kleineren Formaten für Hebelschalter-Grundplatten, sowie beim Bau von Anlassern, Reglern und Widerständen Verwendung. Wegen seiner verhältnismäßig hohen Feuchtigkeitsaufnahme ist es zweckmäßig, die fertig gebohrten Platten nach Austrocknung im Ofen mit einem nicht leitenden Lackanstrich, der gegebenenfalls eingebrannt wird, zu versehen.

5. Schiefer.

Mit dem Solnhofer Lithographiestein, den wir soeben behandelt haben, kommen wir zu dem sehr umfangreichen Gebiet der verschiedenen Schiefersorten. Unter Schiefer im eigentlichen Sinne versteht man jedes in dünne Platten oder Blätter spaltbare Gestein, wie Quarz, Talk, Kalk, Mergel usw. Im allgemeinen Sprachgebrauch versteht man jedoch unter Schiefer den Tonschiefer, ein gleichmäßiges, dichtes, dünnplattiges, meist graues aber auch rötlich, grünlich oder bläulich gefärbtes Gestein. Die Zusammensetzung des Schiefers ist sehr kompliziert, er ist entstanden durch chemische Umlagerung aus Ton und kalihaltigen löslichen Verbindungen und bildet ein feines Gemenge aus Kieselsäure, Tonerde, Eisenoxyd mit Kalk, Magnesia usw.

Ebenso wie Marmor wird auch der Schiefer im Tagebau gewonnen, wo er in unregelmäßigen Platten von etwa 30 bis 80 mm Stärke gebrochen wird. Im Schieferwerk wird er mittels Handmeißels auf die erforderliche Plattenstärke gespalten, ferner auf Maß zugeschnitten, fazettiert usw. Die Bearbeitung ist aber wesentlich leichter, als beim Marmor und geht infolgedessen schneller vor sich.

Von den verschiedenen Schiefersorten möchte ich wiederum nur diejenigen erwähnen, welche für elektrotechnische Zwecke Bedeutung haben. Von ausländischen Schiefersorten kommt hierfür zunächst der

Digitized by Google

rötliche englische Schiefer in Betracht, der außerordentlich homogen und in den Schichten nur schwer spaltbar ist. Ferner der italienische Schiefer, ein graublau geschichtetes Material von leichter Spaltbarkeit, das in Deutschland im großen Umfang Verwendung findet. Der belgische Schiefer, ebenfalls von graublauer Farbe, ähnelt in seinen Eigenschaften mehr den einheimischen Schiefersorten, die als Thüringer- und Ruhrschiefer heutzutage stark der Valutaschwierigkeiten wegen für elektrotechnische Zwecke herangezogen werden. In der Farbe und Schichtung sind diese Schiefersorten vom italienischen Schiefer nicht sehr verschieden, jedoch lassen sie sich infolge ihrer stärker ausgeprägten Schichtung leichter spalten. Alle Schiefersorten sind mehr oder minder hygroskopisch. Der homogene englische Schiefer hat eine geringere Feuchtigkeitsaufnahme, als der italienische, dieser wieder eine geringere, als der deutsche Schiefer. Im allgemeinen schwankt die Feuchtigkeitsaufnahme der verschiedenen Sorten nach 24stündigem Liegem unter Wasser von 20° C. zwischen 0,5 und 1%. Es empfiehlt sich daher den Schiefer nach der Bearbeitung im Ofen zu trocknen und mit einem nicht leitenden Öllacküberzug zu versehen, um Feuchtigkeitsaufnahme zu verhindern.

Ähnlich dem Marmor ist auch Schiefer häufig von leitenden Adern durchsetzt, besonders trifft dies beim deutschen Schiefer zu. Platten für elektrotechnische Zwecke müssen daher ebenso wie Marmorplatten vor Ingebrauchnahme daraufhin untersucht werden. Isolationswiderstand, Oberflächenleitung und Durchschlagsfestigkeit sind in ihren Werten etwas niedriger, als beim Marmor.

Die mechanischen Eigenschaften des Schiefers übertreffen dagegen die des Marmors; seine Biegefestigkeit beträgt 500—550 kg/qm².

Im Gegensatz zum Marmor ist Schiefer gegen Säure unempfindlich, durch Alkalien wird er nur schwach angegriffen. Gegen Öl verhält er sich wie Marmor, d. h. er ist unempfindlich dagegen, saugt aber infolge seiner großen Feuchtigkeitsaufnahmefähigkeit wegen erhebliche Mengen auf. Seine Bearbeitungsfähigkeit ist, wie vorhin schon angedeutet, eine sehr große und leichtere, als die des Marmors. Er läßt sich ohne Mühe bohren, fräsen, feilen usw. Seine Polierfähigkeit ist jedoch nur gering, eine Hochglanzpolitur ist nicht möglich. Wo eine solche erwünscht ist, muß sie durch geeignete Lackierung erreicht werden.

Das Verwendungsgebiet des Schiefers in der Elektrotechnik weicht von dem des Marmors in verschiedenen Punkten nicht unerheblich ab. Da große Platten, wie sie für Schalttafeln in Frage kommen, verhältnismäßig selten und infolgedessen teuer sind, wird Schiefer für diese Zwecke heute kaum noch verwendet. Sein Hauptanwendungsgebiet sind Grundplatten, für Hebelschalter usw., Deckplatten für An-

Digitized by Google

lasser, Regler und sonstige Apparate, als Tragkörper und Distanzhalter für Widerstandsdrähte sowie überhaupt im größten Umfang im elektrotechnischen Kleinbau. Wo Feuchtigkeitsaufnahme in Frage kommt, wird er meistens lackiert oder imprägniert verwendet. Die vorhin schon beim Marmor erwähnten Vorschriften des V.D.E. in § 5 gelten sinngemäß auch für Schiefer.

6. Serpentin.

Als weiteres Gestein, das jedoch nur beschränkte Anwendung in der Elektrotechnik findet, kommt Serpentin in Frage. Sein Name stammt von der schlangenhautartigen Färbung einzelner Sorten; er ist grün, gelb, braun oder rot gefleckt und geädert. Er besteht wie Talk aus wasserhaltigem Magnesiumsilikat und findet sich in Stöcken und Lagern, manchmal auch in Aderform, im Gebiet des kristallinischen Schiefers im Aus- und Inland. In Deutschland wird Serpentin sowohl unterirdisch im Bergbau wie auch im Steinbruchbetrieb, im Tagebau, in Sachsen, Schlesien und im Fichtelgebirge gewonnen. Sein schönes Aussehen und seine hohe Polierfähigkeit haben ihm schon seit langer Zeit einen hervorragenden Platz unter den für künstlerische Zwecke verwendeten Gesteinsarten eingeräumt.

Sein spezifisches Gewicht ist wie das des Marmors 2,5—2,7. Auch die Bearbeitungsfähigkeit ist nicht wesentlich von der des Marmors verschieden. Serpentin läßt sich sägen, hobeln, drehen, fräsen und nimmt beim Polieren einen sehr schönen warmen Glanz an.

Früher wurde Serpentin in der Elektrotechnik häufig für die Herstellung von Selbstinduktionsnormalen in Meßschaltungen verwendet. Da Serpentin jedoch nach Rosa (vergl. auch Orlich, Kapazität und Induktivität, Seite 183) magnetisierbare Substanzen enthält und die Permeabilität des Serpentins nicht konstant ist, so ist der Selbstinduktionskoeffizient einer auf Serpentin gewickelten Rolle von der Frequenz und der Größe der Stromstärke abhängig, bei der man die Messung ausführt. Wenn auch die Abweichung praktisch sehr klein ist, so ist sie doch für Normalrollen nicht zu vernachlässigen. Man verwendet infolgedessen für diese Rollen jetzt imprägnierten, möglichst aderfreien Marmor. Auch in der Funkentelegraphie ist man von der Verwendung des Serpentins beim Bau von Variometern aus dem gleichen Grunde abgegangen und verwendet jetzt dort Spulen von Hartpapier.

Zurzeit kommt Serpentin als Baustoff noch für Feinmeßinstrumente in Betracht, wie zum Beispiel für Spiegelelektrodynamometer, wo keine durch Induktionswirkung störenden Metallmassen vorhanden sein dürfen. Ferner wird Serpentin in Form von Stäben und geriffelten Platten, lackiert und im Ofen getrocknet in Heizapparaten für Wagenheizung als Tragkörper für die Drähte verwendet.

Digitized by Google

Die genannten Verwendungsbeispiele zeigen, daß es sich um Spezialgebiete handelt, für die erhebliche Mengen von Material nicht in Betracht kommen.

Faseriger Serpentinstein bildet den sogenannten Serpentinasbest. Hiermit kommen wir zu dem nächsten natürlichen Isolierstoff, der in der Elektrotechnik Anwendung findet, nämlich zum Asbest.

7. Asbest.

Der Asbest, dessen Name bekanntlich aus dem Griechischen ἀσβέστος stammt, d. h. unverbrennbar, hat sowohl wegen dieser Eigenschaft, wie auch wegen seiner Säurebeständigkeit große Verbreitung in der Technik gefunden.

Geschichtliches.

Asbest war schon im Altertum bekannt, wie aus den in alten römischen Grabstätten gefundenen Asbestgeweben hervorgeht. Man verwendete vielfach Tücher aus Asbest zum Einwickeln von Leichen, die verbrannt wurden, um die Asche des Verstorbenen möglichst rein, getrennt von der Holzasche, zu erhalten. Ferner wurden Asbestgewebe als Tischtücher verwendet. In späteren Zeiten scheint der Asbest jedoch völlig in Vergessenheit geraten zu sein, jedenfalls hat man kaum etwas davon gehört. Erst um die Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde der Asbest durch die Amerikaner wieder mehr bekannt und vor allem industriell verwertet.

Vorkommen.

Die Hauptlagerstätte von Asbest ist Canada, wo der sogenannte Serpentin-Asbest gewonnen wird. In Rußland finden sich große Lager von sogen. Hornblenden-Asbest im Gouvernement Perm. Ferner ist der blaue und weiße Cap-Asbest aus Südafrika zu erwähnen. Außer diesen 3 genannten Hauptsorten finden sich noch geringere Mengen in den Ver. Staaten von Nordamerika, in Oberitalien, in Finnland usw., teilweise auch in Deutschland.

Über die Jahreserzeugung der einzelnen Sorten entnehme ich dem Aufsatz von Marine-Oberbaurat Schulz über „Asbest in der Kriegswirtschaft“ (erschienen in Technik und Wirtschaft XIII. Jahrgang 1920 Heft 1) sowie einigen Privatmitteilungen der Rohasbestfirma Becker & Haag, Berlin, folgende Zahlen:

	1907	1911	1914	1918
Canada:	62,000 t	100,000 t		142,000 t
Rußland:		15,000 t	30,000 t	
Südafrika:				7—8,000 t
Ver. Staaten:			rd. 5,000 t	
Deutschland:	im Kriege rd. 1,000 t.			

Digitized by Google

Wie wir aus dieser Zusammenstellung ersehen, liefert Canada die Hauptmenge an Asbestfaser. Der canadische Asbest findet sich in

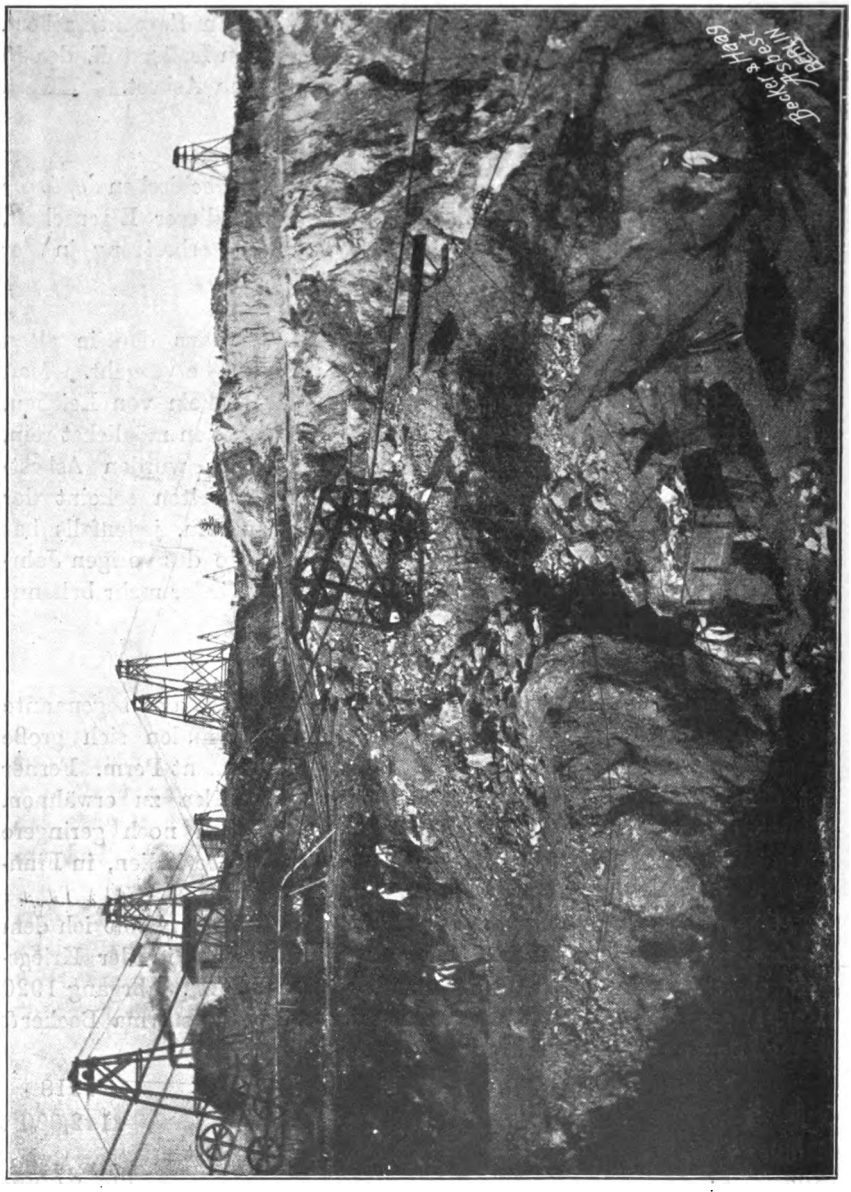


Abb. 3. Asbest-Abbau in Canada.

Adern von wenigen Millimetern bis zu etwa 8 cm Breite und mehreren Metern Länge in einem sehr harten Serpentingestein eingebettet. Er

Digitized by Google

wird in Gruben, die im Tagebau betrieben werden und eine Tiefe von etwa 100 m haben (Abb. 3), gewonnen. Die Härte des Gesteins macht die Anwendung von Sprengmitteln erforderlich. Die den größten Teil an spinnfähigen Fasern enthaltenden Adern, die sogen. Crude-

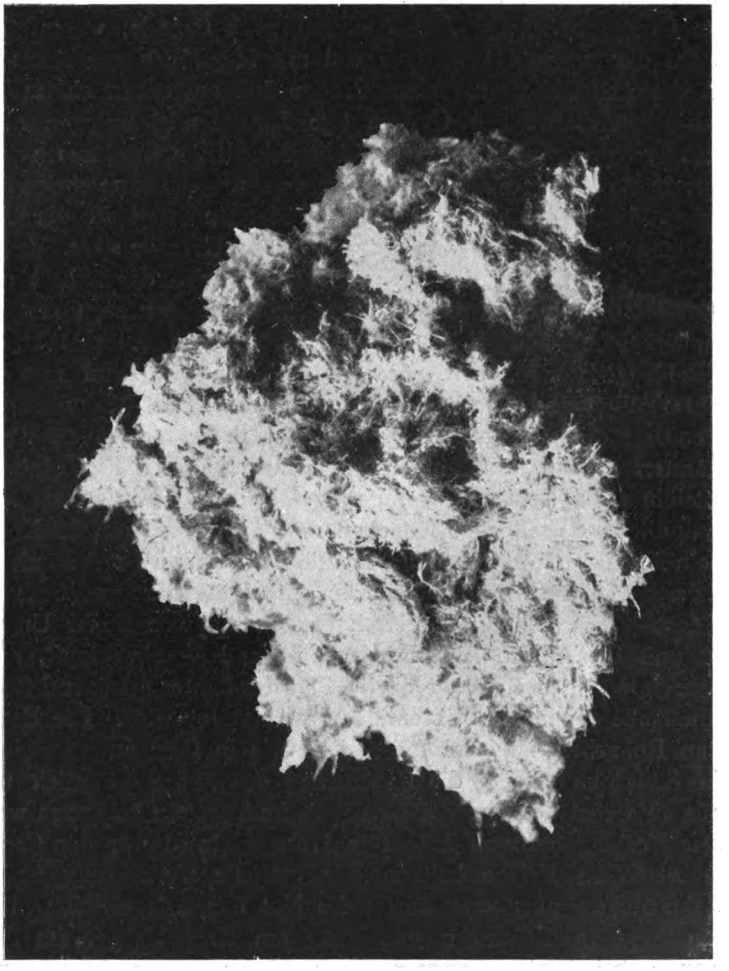


Abb. 4. Minenfibre.

adern, werden von dem gesprengten Gestein mit dem Hammer abgeschlagen und von Hand sortiert und gereinigt. In dieser Form kommt die Crude in den Handel.

Das Gestein mit den kleinen und mittelgroßen Adern, deren Gewinnung durch Handarbeit zu teuer werden würde, gelangt zur Aufbereitung in die Fibremühlen. In den Mühlen wird das Gestein in Kollergängen zermahlen, wobei die Asbestfaser herausgelöst wird.

Digitized by Google

Die weitere Sortierung nach der Länge geschieht durch Rüttelsiebe mit verschieden großen Maschen. Damit ist die Ware, die unter dem Namen Minenfibre (Abb. 4) gehandelt wird, versandfertig. Die Ausbeute der Felsmassen an Rohasbest ist verhältnismäßig gering und schwankt zwischen 3 und 8%.

Im Gegensatz zu der Asbestgewinnung in Canada, wo mit Rücksicht auf die hohen Arbeitslöhne viel mit Maschinen gearbeitet wird, findet der Abbau der russischen Gruben fast ausschließlich im Handbetrieb statt, zumal das Gestein (die Hornblende) weicher, als der canadische Serpentin ist und die Arbeitskräfte, wenigstens vor dem Kriege, in Rußland bedeutend billiger waren. Um eine große Menge Menschen beschäftigen zu können, findet in Rußland der Abbau des Asbests terrassenförmig auf ausgedehntem Gelände statt. (Abb. 5.) Mit Rücksicht auf das dortige rauhe Klima wird der Asbest nur in den Sommermonaten gebrochen, nachdem die Bauern der umliegenden Gegend, welche gleichzeitig als Grubenarbeiter in Betracht kommen, ihre Felder bestellt haben. Sie ziehen dann mit Kind und Kegel, mit ihrem Vieh und sämtlichem Hausrat auf kleinen Wagen in großen Scharen zu den Gruben, wo manchmal mehr als 15000 Arbeiter — Männer, Frauen und Kinder — gleichzeitig beschäftigt sind. Die Arbeitslöhne sind, wie gesagt, gering. In der Vorkriegszeit erhielt ein männlicher Arbeiter 40 Kopeken den Tag, eine Frau 25 Kopeken und ein Kind 15 Kopeken, eine dreiköpfige Familie hatte somit einen Tagesverdienst von etwa 80 Kopeken. Mit Spitzhacke und Steinkeilen wird den kurzen Sommer hindurch das Gestein von seiner Unterlage gelöst und die Adern — ebenfalls von Hand — abgeklopft, sortiert und gereinigt, so daß für die übrige Zeit des Jahres genügend Material für die Kollergänge der Fibremühlen vorbereitet wird. Die Ergiebigkeit an Rohasbest ist etwa die gleiche wie in Canada.

In Südafrika erfolgt die Gewinnung des Asbests ähnlich wie in Canada in tiefen Gruben, die gleichfalls im Tagebau betrieben werden.

Das Vorkommen von Asbest in Deutschland war den Geologen schon vor dem Kriege bekannt, industrielle Verwertung fand der deutsche Asbest aber erst durch die Not des Krieges. Der Hauptfundort liegt in Thüringen und zwar am Kacholdsberg im Reußer Oberlande bei Klettigshammer. Der Abbau dieses Asbests wurde von der Firma Feodor Burgmann, Dresden-Laubegast, übernommen, die in Klettigshammer ein Bergwerksunternehmen gründete. Auch an anderen Stellen Deutschlands z. B. bei Saalfeld sowie in der Nähe von Hof bei Bad Steben wurden Asbestlagerstätten entdeckt und nutzbar gemacht.

Der deutsche Asbest wird, ebenso wie die ausländischen Sorten, im Tagebau gewonnen, kommt aber nicht in fortlaufenden Adern,

Digitized by Google

sondern nur in Nestern als Asbesterde vor. Um von einer Fundstelle zur anderen zu gelangen, müssen daher bedeutende Erdmassen

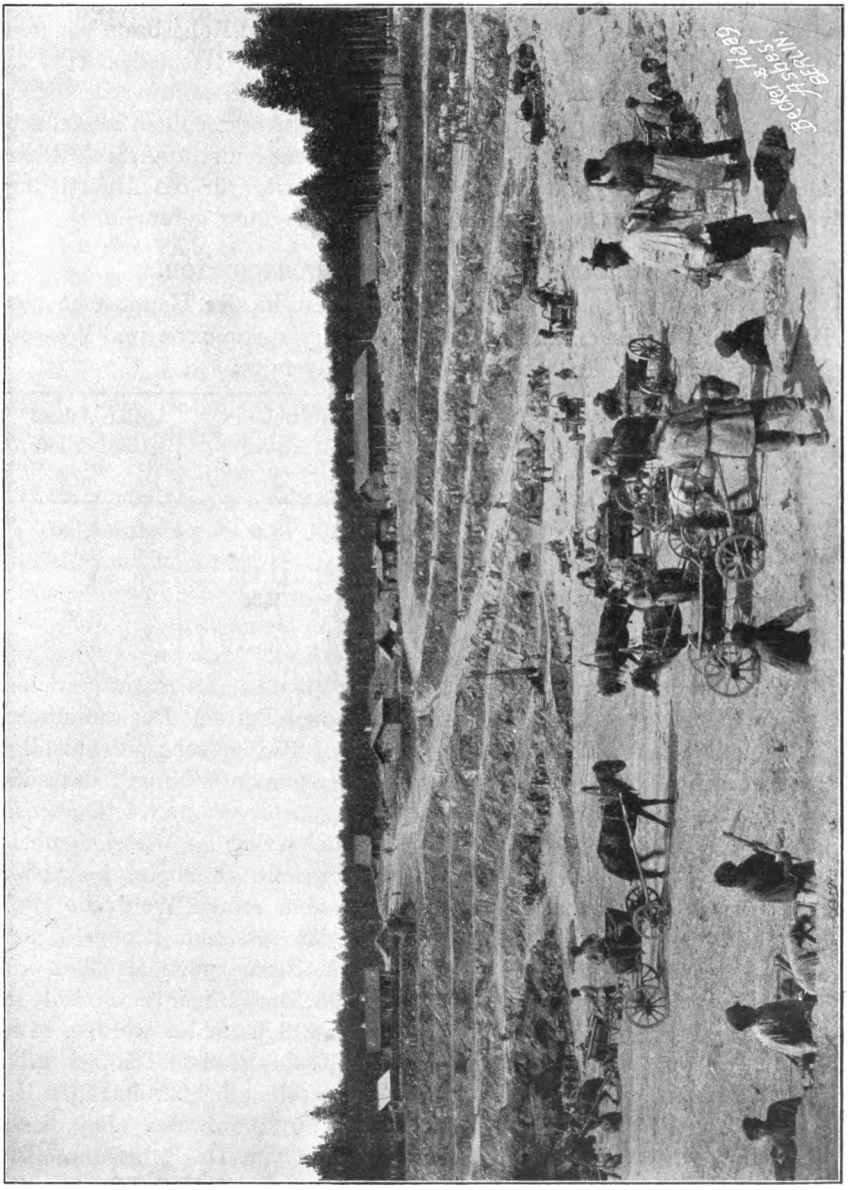


Abb. 5. Asbest-Abbau in Rußland.

bewegt werden. Ist ein Nest entdeckt, so heben die Arbeiter von Hand mit Hilfe einer kleinen Hacke die Asbesterde heraus, füllen sie

Digitized by Google

in geeignete Gefäße und leiten sie den Aufbereitungsstellen zu. Die Asbesterde enthält Asbestfasern in verschiedenen Längen, außerdem aber viele Unreinigkeiten, wie Erde, Sand, Steine usw. Infolgedessen weichen die Aufbereitungsmethoden des deutschen Rohasbests von den der ausländischen Sorten erheblich ab. Nach verschiedenen z. T. vergeblich ausgeführten Versuchen hat sich die Aufbereitung des deutschen Asbests durch geeignete Trommel- und Siebmaschinen schließlich am besten bewährt. Für Spinnzwecke ist der deutsche Asbest leider nicht geeignet, dagegen hat er als Pappenfaser für die Anfertigung von Wellpappen während des Krieges Verwendung gefunden.

Zusammensetzung und Eigenschaften.

Die verschiedenen Asbestsorten bestehen in der Hauptsache aus Kieselsäure, Magnesia, Eisenoxyd, Tonerde, Natriumoxyd und Wasser. Die Analysen von Rohasbesten ergaben folgendes:

	Canada-Asbest %	Hornblenden-Asbest %	Blau-Asbest (Südafrika) %
Kieselsäure	41,21	54,6	51,1
Magnesia	41,75	27,85	2,3
Eisenoxyd	2,52	11,15	35,8
Tonerde	0,60	2,85	—
Natriumoxyd	—	—	6,9
Wasser	13,92	3,55	3,9

Die vorstehenden Analysenangaben erklären bis zum gewissen Grade das verschiedene Verhalten der einzelnen Sorten. Der canadische Asbest mit einem Wassergehalt von rd. 14 % ist sehr geschmeidig, fühlt sich fettig an und läßt sich gut verspinnen, während der südafrikanische Blauasbest mit einem Wassergehalt von nur 4 % ebenso wie der Hornblendenasbest eine mehr holzwollartige Beschaffenheit aufweist. Die Farbe ist vom Eisenoxydgehalt abhängig, je größer dieser ist, um so mehr weicht die Farbe vom reinen Weiß ab. Der canadische Asbest ist annähernd weiß, der russische strohgelb, der südafrikanische Cap-Asbest mit etwa 36 % Eisenoxydgehalt blau.

Über die Festigkeit von Asbest bei höheren Temperaturen ist von Dr. Bayer in der Z. d. V. D. J. 1916, Seite 533 berichtet worden. Danach widerstehen Gewebe aus reinem Weißasbest hohen Temperaturen (300°) am besten, während blauer Asbest schon bei zweimaliger Erhitzung eine Festigkeitsabnahme von rd. 20 % aufweist. Bei dieser Gelegenheit möchte ich auf die Dissertation von Dr. Burgmann „Die Asbestspinnerei“ Dresden 1908 hinweisen, in der alles Wissenswerte über die Festigkeit der verschiedenen Asbestfasern zu finden ist. Erwähnen möchte ich nur, daß die Asbestfaser im Durchschnitt eine

Digitized by Google

Reißlänge von nur 0,5 bis 1,5 km bei einer Dehnung von 6 — 7 % besitzen. Das ist im Vergleich zu den entsprechenden Werten der sonst gebräuchlichen Faserstoffe, wie Baumwolle mit 8 — 12 km oder Naturseide mit 25 — 35 km Reißlänge außerordentlich gering. Aus diesem Grunde wird bei der Herstellung von Asbestgarnen ein gewisser Prozentsatz Baumwollfasern mit den Asbestfasern gemischt und zu einer gleichmäßig durchgearbeiteten Spinnfaser hergerichtet, um den Beanspruchungen auf den Spinn- und Zwirnmaschinen usw. zu widerstehen.

Verarbeitung.

Von der Verarbeitung des Rohasbests in den Asbestwerken wollen wir nur diejenigen Arbeitsmethoden besprechen, die zu Fertigfabrikaten führen, die für den Elektrotechniker von Wichtigkeit sind. Es sind dies die Asbestgarne und die Asbestpappen.

Der Rohasbest gelangt aus dem Lagerraum zunächst auf die Kollergänge, die heuzutage fast ausschließlich mit Steinläufern versehen sind. Durch das Kollern werden die Fasern von dem tauben Gestein und dem Sand gelöst und die einzelnen Faserteilchen aufgelockert. Ist das Material genügend lange auf dem Kollergang bearbeitet, wird es durch die neben den Mahlsteinen eingestellten Abstreicher ausgeworfen und kommt von hier zu dem sogen. Öffner. (Abb. 6). Die Fasern werden durch den an der Außenseite sichtbaren Trichter eingeworfen und gelangen zu einem zweiten inneren Trichter, aus welchem sie durch die darin befindlichen Schläger sowie durch den Saugzug des hier befindlichen Ventilators in die Höhe gerissen werden. Hierbei werden die kurzen Asbestfasern sowie die Unreinheiten durch den hier ersichtlichen gußeisernen Maschenrost abgeschleudert. Die geöffneten Fasern fliegen dann gegen die Siebtrommel, durch welche die letzten Reste an Sand und Staub abgesaugt werden. Die Fasern gelangen auf den Transport-Lattentisch und verlassen den Öffner in Form weicher Watte. Vom Öffner kommt das Material zur Krempel. Hier wird die Faser in einen Speiseapparat gefüllt, von dem sie von Zeit zu Zeit in eine rinnenförmige Wage gelangt. Je nach der Stärke des herzustellenden Garns wird die entsprechende Menge Fasern abgewogen, und auf den Krempeltisch geworfen. Hier wird die Faser zunächst von den Vorreißwalzen, welche mit Sägezähnen besetzt sind, erfaßt und durch die Arbeiter- und Wenderwalzen auf dem Tambour übertragen. Der Tambour ist eine große mit feinen kniefömig gebogenen Stahlzähnen besetzte Trommel, durch welche die Faser gerichtet und gekämmt wird, um schließlich vom Peigneur, einer ebenfalls mit Zähnen besetzten Walze abgenommen zu werden. Das Material bildet nunmehr einen weichen, watteförmigen zusammenhängenden Flor, der je nach der Breite der Maschine etwa 125 — 150 cm mißt. Die Breite

Digitized by Google

wird durch die Florteiler in einzelne Bänder zerlegt, die je nach der gewünschten Garnstärke verschieden breit sind. Die Bänder transportieren weiter in die aus Leder hergestellten Nitschelhosen und werden hier durch die gegenseitige Hin- und Herbewegung der Lederflächen, die sich flach um sich selbst drehen, zum Vorgarn zusammengerollt. Das Vorgarn wird am Ende der Maschine fortlaufend aufgewickelt. Die Verspinnung des Vorgangs geschieht auf den auch in der Baumwollindustrie üblichen Spinnmaschinen (Flyer oder Ringspinnmaschinen).

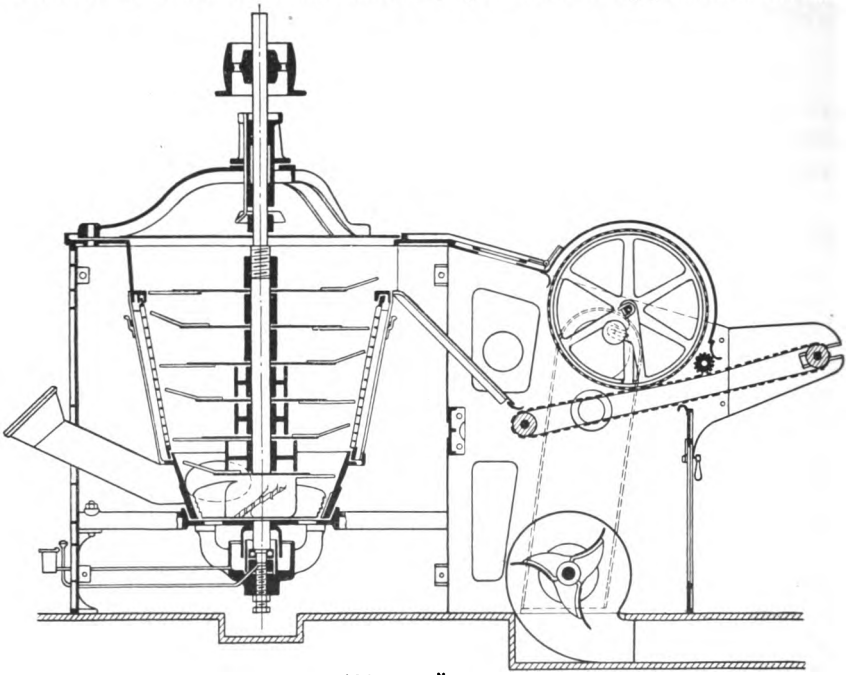


Abb. 6. Öffner.

Das versponnene Garn wird nach Bedarf gezwirnt und in der gleichen Weise wie Baumwollgarne auf mechanischen Webstühlen zu Geweben verarbeitet.

Zur Fabrikation der Asbestpappen bedient man sich, ebenso wie bei der Papierpappenfabrikation des Holländers, in dem die hierzu in Frage kommenden Asbestfasern — in der Hauptsache kurze Fasern — mit Kaolin und Bindemitteln sowie mit Abfällen von alten Asbestpappen vermischt und mit Wasser aufgeschwämmt werden. Die im Holländer befindliche Walze ist mit Messern besetzt, und gegen das Grundwerk, ein mit einem Messereinsatz versehenen Kasten, verstellbar. Durch die Umdrehung der Walze wird die gesamte Asbestbreimasse in Bewegung gesetzt und langsam durchgemahlen. Ist

Digitized by Google

alles gut durcheinander gemischt, was nach einigen Stunden der Fall ist, wird der Asbestbrei abgelassen und unter Wasserzusatz auf die Siebtrommel der Pappenmaschine geleitet. Während das Wasser durch das Sieb abfließt, bildet sich auf der Oberfläche der Trommel ein dünner Flor, der über einen endlosen Filzstreifen auf die Formatwalze transportiert wird. Hat die Pappe die erforderliche Stärke erreicht, so ertönt automatisch ein Klingelzeichen und veranlaßt den die Maschine bedienenden Arbeiter, die Platten von der Walze abzuschneiden. Die Pappen kommen nunmehr unter eine hydraulische Presse, wo sie unter hohem Druck — 150 bis 250 Atm. — zusammengepreßt werden. Nach der Pressung gelangen die Pappen in den Trockenraum, in dem sie unter Anwendung künstlicher Wärme getrocknet werden. Da sie sich hierbei manchmal verziehen und wellig werden, passieren sie noch einen Kalander, auf dem sie eine glatte Oberfläche erhalten. Alsdann werden die Pappen auf Schneidemaschinen beschnitten bzw. ausgestanzt und sind dann zum Versand fertig.

Verwendung.

In der Elektrotechnik ist die Verwendung von Asbest infolge seiner großen Feuchtigkeitsaufnahme nur auf einige Fälle beschränkt. So finden wir Asbestschnur als isolierenden Tragkörper für Widerstandsdrähte und -Bänder in hoch belasteten Widerständen und Heizkörpern, wie sie z. B. von der Firma C. Schniewindt, Neuenrade i/Westfalen hergestellt werden. Abb. 7 und 8 zeigen derartig aufgebaute Heizgitter.

Ein zweiter Fall, in dem Asbest als elektrischer Isolierstoff benutzt wird, findet sich bei Stromzuführungen, die betriebsmäßig hohen Wärmegraden ausgesetzt sind. Der Draht wird hierbei zunächst einfach mit Asbestgarn umsponnen und darüber mit Asbestfäden umklöppelt. Auch für Gummiaderleitungen, die betriebsmäßig großer Hitze ausgesetzt sind z. B. Zuleitungen für Backofenlampen wird eine Asbestumklöppelung, die sich über die verseilten Gummiadern legt, verwendet.

In den vorerwähnten Fällen spielt die Hygroskopizität des Asbests keine Rolle, da die erwähnten Apparate im Betriebe stark erhitzt werden und die im Asbest enthaltene Feuchtigkeit infolgedessen verdampft.

Asbestpappen finden wir in der Elektrotechnik noch vielfach im Maschinen- und Apparatebau als Auskleidung von Gehäuseteilen, Anwendung, um gegen Schaltfeuer und dergl. zu schützen. Meistens stellen hier die Asbestpappen eine Kombination von elektrischer und Wärmeisolierung dar. Auch für die Herstellung von Sicherungspatronen wird Asbestpappe noch in größerem Umfange verwendet.

Erwähnen möchte ich noch den sogen. Asbestschiefer dessen Fabrikation nur unwesentlich von der der Asbestpappen verschieden

Digitized by Google

ist. Als Bindemittel wird in der Hauptsache Zement verwendet. Asbestschiefer, der infolge seiner guten Wärmeisolierung für Bauzwecke vielfach als Dachbedeckungsmaterial angewendet wird (im Kriege wurden die Dächer von Luftschiffhallen vorzugsweise aus diesem Material hergestellt), hat auch in der Elektrotechnik ein großes Verwendungsgebiet gefunden. Als Funkenfächer an Fahrschaltern, als Zwischenwände bei Hörnerableitern sowie in allen den Fällen, wo es darauf ankommt, Schaltfunken unschädlich zu machen, finden wir Asbestschiefer vor.

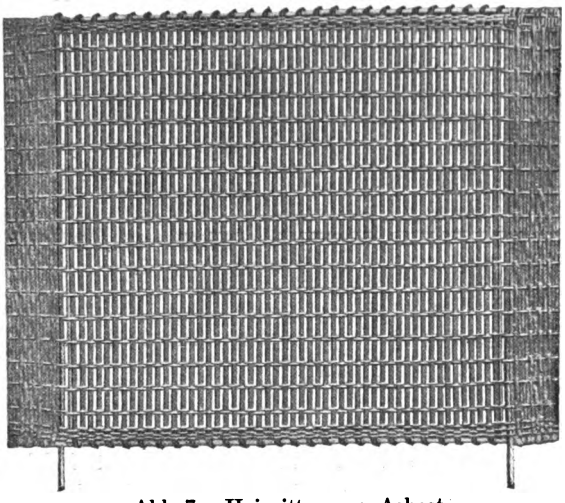


Abb. 7. Heizgitter aus Asbest.

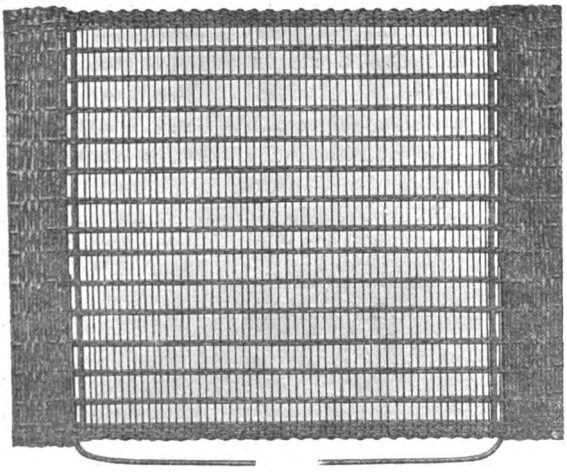


Abb. 8. Heizgitter aus Asbest.

Schließlich spielt Asbest noch eine große Rolle bei der Herstellung der sog. künstlichen Isolierstoffe wie Gummon, Ambroin usw. Hierbei werden die Asbestfasern in Verbindung mit Asphalt, Pech oder Kunstharzen gebracht und bilden dann Körper von hoher Festigkeit und großer Wärmebeständigkeit. Auch in Verbindung mit Kautschuk wird Asbest als sogen. Vulkanasbest zu einem geeigneten Isolierstoff verarbeitet.

8. Holz.

Zum Schluß noch ein paar Worte über die Verwendung von Holz für elektrische Isolierungszwecke.

Digitized by Google

In den Anfängen der Elektrotechnik, als noch mit verhältnismäßig geringen Spannungen (65 und 110 Volt) gearbeitet wurde, war Holz seiner leichten Bearbeitbarkeit und seines geringen spezifischen Gewichts wegen ein sehr beliebter Isolierstoff. Infolge seiner großen Feuchtigkeitsaufnahme und hohen Brennbarkeit wurde aber das Holz bei der mit der Entwicklung der Elektrotechnik Hand in Hand gehenden Spannungssteigerung immer mehr zurückgedrängt und durch andere weniger hygroskopische und weniger brennbare Stoffe ersetzt.

K. Wernicke teilt in seinem Buch „Die Isoliermittel der Elektrotechnik" über die Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Hölzer folgende Versuchsergebnisse mit: Platten von 20 × 20 cm Größe und Dicken von 0,5 bis 2 cm, die einige Tage in Luft von 84% Feuchtigkeitsgehalt gelegen hatten, wurden gewogen, alsdann im Vakuumofen bei 100° C. getrocknet und wieder gewogen. Als Mittelwerte der Feuchtigkeitsaufnahme für die verschiedenen Holzarten ergaben sich:

Übersee-Holz	6%	Pappel	10%
Buche	8%	Elsen	11%
Ahorn	9%	Kiefer	12%
Eiche	9%		

Wie man hieraus ersieht, hat Kiefer trotz ihres Harzgehaltes die größte Feuchtigkeitsaufnahme, was jedoch wahrscheinlich dadurch zu erklären ist, daß die Harze beim Trocknen im Vakuumofen verflüchtigt sind, so daß die angegebenen Werte nicht ganz einwandfrei sind. Aber auch die Werte der übrigen Holzarten sind reichlich hoch, um die Verwendung des Holzes als Isolierstoff in Frage zu stellen. Bei Verwendung des Holzes unter Öl fallen die Bedenken der Feuchtigkeitsaufnahme jedoch fort; der V.D.E. bestimmt daher in seinen Errichtungsvorschriften im § 5 Abs. 6: „Material wie Holz und Fiber sollen nur unter Öl und nur mit geeigneter Isoliermasse getränkt als Isolierstoff angewendet werden." Für provisorische Einrichtungen, Prüffelder und Laboratorien ist Holz nach § 37 bei Schalt- und Verteilungstafel als Baustoff, nicht aber als Isolierststoff zulässig. Wer aber einmal einen Blick in die Laboratorien getan hat, der weiß, daß auch heute noch in vielen Fällen von der Bestimmung abgewichen wird und Holz sehr häufig auch als Isolierstoff für Niederspannungszwecke verwendet wird. Man muß hierbei natürlich berücksichtigen, daß derartige Einrichtungen nur von Fachleuten bedient werden, die sich der Gefahr, die eine zufällige oder fahrlässige Berührung mit sich bringt, voll bewußt sind. In der Tat hört man auch kaum von Unfällen in Laboratorien, die hierauf zurückzuführen sind, zumal die sonstigen Vorschriften für derartige Räume im allgemeinen, besonders aber bei Hochspannung, in allen Betrieben streng gehandhabt werden.

Auf der Bühne im Theater soll Holz gemäß § 39 Abs. 6 der Vor-

Digitized by Google

schriften nur bei vorübergehend gebrauchten Bühnenbeleuchtungskörpern und nur als Baustoff zulässig sein.

Früher wurde Holz gern als Holzleisten für Verlegung von Leitungen benutzt. Wegen der Feuersgefahr bei etwaigen Kurzschlüssen ist dies aber durch die V.D.E. Bestimmungen § 25 verboten. Für Bahnzwecke gilt jedoch folgende Ausnahme: § 36 g „Bei Bahnen, bei denen die Fahrgäste auf der Strecke gefahrlos ins Freie gelangen können, dürfen in dem Wagen isolierte Leitungen unmittelbar auf Holz verlegt und Holzleisten zur Verkleidung derselben benutzt werden".

Im modernen Elektro-Apparatebau findet imprägniertes Holz unter Öl bei Ölschaltern und Öltransformatoren als Isolierstoff noch Verwendung. Es hat sich in diesen Spezialfällen auch nicht schlecht bewährt. Die allgemeine Entwicklung des Elektro-Maschinen- und -Apparatebaus geht aber dahin, Holz nur noch als Baustoff zu verwenden und seine Anwendung als Isolierstoff durch künstliche Isolierstoffe zu ersetzen.

Wie wir gesehen haben, bedürfen die natürlichen Isolierstoffe einer mehr oder minder sorgfältigen Nachbehandlung, um sie für die in Betracht kommenden elektrotechnischen Zwecke geeignet zu machen, da keiner der genannten Stoffe im ursprünglichen Zustande immer die gleichen Eigenschaften aufweist. Es lag daher für die Technik sehr nahe, nachdem man einmal die für einen Isolierstoff maßgebenden Eigenschaften richtig erkannt hatte, isolierende Stoffe künstlich herzustellen, welche einem idealen Dielektrikum möglichst nahe kommen.

Digitized by Google

III. Glimmer und Glimmerprodukte.

Von R. Schröder.

Der Glimmer gilt als eins der wertvollsten Isoliermaterialien; wertvoll sowohl in seinen Eigenschaften technischer Art, als auch hinsichtlich des Preises. Seine wichtigsten technischen Anwendungen und Eigenschaften, aber auch sein Vorkommen, Gewinnung und Weiterverarbeitung sollen betrachtet werden.

Der Glimmer selbst ist seit altersher bekannt. Schon Plinius erwähnt ihn in seiner im ersten nachchristlichen Jahrhundert erschienenen historia naturalis.

Der Glimmer hat in der mittelalterlichen Alchemie eine ganze Anzahl Namen, die seinem charakteristischen Aussehen und Eigenschaften einen ausgeprägten Ausdruck geben: *διαφανές*, lapis specularis, magnetes ammochrysos, Katzensilber, Katzengold, dann „unserer lieben Frau Eysspat". Die letztere Bezeichnung hat sich bis auf den heutigen Tag erhalten in dem Ausdruck „Marienglas". Noch jetzt wird er im Volksmunde häufig so bezeichnet und teilweise ist auch dieser Ausdruck in die Technik gedrungen. Jedoch wird der Name „Marienglas" viel häufiger, auch in wissenschaftlichen Kreisen, für kristallisierten Gips benutzt, welcher an zahlreichen Orten Deutschlands in ziemlich großen Kristallplatten vorkommt.

Das Aussehen dieses kristallisierten Gipses ist jedoch völlig anders, als das des Glimmers und wohl eigentlich kaum mit Glimmer zu verwechseln. Allerdings ist auch er verhältnismäßig stark durchscheinend, aber fast nie vollkommen durchsichtig. Vor allen Dingen aber ist er nicht spaltbar, auch leicht zerbrechlich, alles Eigenschaften, die wesentlich von denen des Glimmers verschieden sind.

Im 17. und 18. Jahrhundert wurde Glimmer in verhältnismäßig großem Maßstabe in Rußland gewonnen und zum Bedecken der Marienbilder verwendet, um die Bilder selbst gegen die Küsse der Gläubigen zu schützen.

Über Sibirien und Rußland ist die Bekanntschaft des Glimmers in der neueren Zeit nach Deutschland gedrungen und somit auch der Name „Marienglas" nach seiner Verwendung wieder in dem Volksgedächtnis erneuert worden.

Der Begründer der wissenschaftlichen Geologie Werner (1750—1800) hat den deutschen Namen „Glimmer" geschaffen und man sollte

Digitized by Google

daher diesen charakteristischen Namen heute nur noch ausschließlich verwenden und den alten Namen „Marienglas", der zu vielen Verwechslungen Anlaß gab, dem kristallisierten Gips überlassen.

In der englischen Sprache und denen lateinischen Ursprungs wird der Glimmer „Mica" genannt, in der russischen „Sludá".

Während zu Anfang des 19. Jahrhunderts hauptsächlich der Ural und zum geringen Teil Sibirien Hauptfundorte für Glimmer und zwar für gute, klare Platten waren, ist Rußland in den letzten Jahrzehnten als Produktionsland nicht mehr anzusprechen. Wohl wurden einzelne Glimmerfundstätten ausgebeutet, aber die Einfuhr überwog die eigene Produktion, trotz des verhältnismäßig geringen Glimmerverbrauchs in Rußland, außerordentlich stark. Ich möchte auf diese Tatsache besonders hinweisen, weil von russischen Glimmerfundstätten sehr viel gesprochen wird. Sicher ist nur das eine, daß sich in Sibirien geologische Verhältnisse vorfinden, die auf das Vorhandensein größerer Glimmervorkommen hindeuten. Es kann also in Zukunft ein Glimmerbergbau in Sibirien sehr wohl erstehen, nachdem geordnete Verhältnisse zurückgekehrt sind und insbesondere auch die Verkehrsverhältnisse sich selbst gegenüber dem zaristischen Rußland noch wesentlich gebessert haben werden.

Als in der Mitte des 19. Jahrhunderts die wichtigen Eigenschaften des Glimmers entdeckt wurden und sich die beginnende Elektrotechnik des Glimmers als Isoliermaterial zu bedienen begann, reichten die geringen aus Rußland und Britisch-Indien stammenden Glimmermengen, die fast nur aus klaren, großen Platten bestanden, nicht mehr aus, um den Bedarf zu befriedigen. Britisch-Ostindien, in welchem die Glimmervorkommen den Eingeborenen seit Jahrtausenden bekannt waren, sollte berufen sein, den immer steigenden Bedarf der Technik zu decken und sich zum bedeutendsten Glimmerlande zu entwickeln. Schon in den 60iger Jahren setzte diese Entwicklung zuerst zaghaft ein, um in den Jahren 1870—1878 zu einer immer stürmischer werdenden anzuwachsen.

Die Fundorte lagen in Bengalen zwischen den südlichen Ausläufern des Himalaja und dem durch die Gangesmündung laufenden Breitengrade.

In das Ende der siebziger Jahre fiel die Entdeckung der Glimmervorkommen in den Vereinigten Staaten, 1882 wurden neue Felder in Kanada aufgefunden, mitte der neunziger Jahre wurden diejenigen in Ostindien entdeckt, welche in der Nähe von Madras lagen und als unabhängig von den früher bekannten zu betrachten sind.

In der neuesten Zeit, um die Wende des Jahrhunderts, wurden in Brasilien in verschiedenen Provinzen, besonders aber in der Provinz Minas de Geräes, während des ersten Jahrzehntes auch in Argentinien,

Digitized by Google

recht erhebliche Entdeckungen gemacht. Die beiden letzt erwähnten südamerikanischen Vorkommen sind besonders während des Krieges zu einer erfolgreichen, und nunmehr sicherlich anhaltenden und fortschreitenden Entwicklung gelangt.

A. Naturglimmer.

Ich möchte zuerst kurz verschiedene physikalische Eigenschaften des Glimmers erwähnen, die für den Elektrotechniker nicht allzu wichtig sind, die aber immerhin gewisses Interesse haben.

Der Glimmer ist ein doppelbrechendes Kristall. Diese Eigenschaft kann man nicht so einfach erkennen wie bei den als Doppelspat bekannten Kalkspatkristallen. In einem doppelbrechenden Kristall gibt es Richtungen, in denen eine Doppelbrechung nicht stattfindet, und zwar eine oder zwei solcher ausgezeichneten Richtungen. Nach der Anzahl solcher, die Doppelbrechung nicht aufweisenden Richtungen bezeichnet man diese Kristalle als optisch ein- oder zweiachsig. Zu den optisch zweiachsigen Kristallen gehört nun der Glimmer.

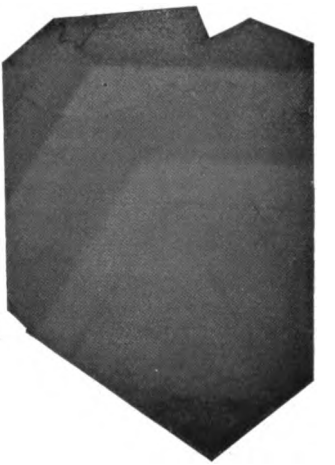


Abb. 1.

Betrachtet man ein solches doppelbrechendes z. B. zweiachsiges Kristall, wie den Glimmer, im polarisierten Licht, dessen Schwingungen nur in einer Ebene laufen, so werden Brechungen am stärksten in den zu den optischen Achsen senkrechten Richtungen entstehen, während die Brechungen in den Richtungen der optischen Achsen selbst zu Null werden. Nach der Theorie der Kristalloptik müssen in solchen Fällen als sichtbare Figuren cassinische Linien entstehen, welche bei Verwendung mehrfarbigen Lichts in prächtigen Farben erscheinen.

Der Glimmer weist derartige cassinische Linien im polarisierten Licht auf; er ist also ein doppelbrechendes Kristall.

Der Glimmer gehört dem Monoklinen-System an, während man ihn früher wegen der sechseckigen Kristallfiguren (Abb. 1), die man nicht gar zu selten bei ostafrikanischem Glimmer findet, dem hexagonalen System einreihte. Wie die genauen Messungen jedoch ergeben haben, sind die Winkel nie genau 120°. Die Kristallfiguren zeichnen sich sehr deutlich im Glimmer ab.

Die Härte des Glimmers liegt zwischen 2,1 bis 2,5 der Härteskala, welche die Härte des Talkes mit 1, die Härte des Diamanten mit 10

Digitized by Google

als Grenzpunkte annimmt; er ist also härter als Steinsalz oder Gips, aber weicher als Kalkspat.

Die Härte des Glimmers spielt eine erhebliche Rolle beim Bau und Betrieb von Gleichstrom-Kollektoren. Da Kupfer sich unter den Bürsten leichter abnutzt, als die isolierenden Glimmerzwischenlagen, so tritt der Glimmer nach längerer Betriebsdauer scheinbar gegen die Kupferzylinderfläche hervor. Dieses sogenannte Wachsen des Glimmers ist eben die Folge der höheren Kupferabnutzung und im Betriebe in früheren Jahren eine der häufigsten und unangenehmsten Ursachen von Betriebsstörungen an dem Kollektor gewesen. Durch die Einführung hartgezogener Kupferlamellen, ferner geeigneter Zusammenstellung von Kohlen mit Metalleinlagen bei den Stromsammlerbürsten, auch Auskratzen des Glimmers derart, daß der Glimmer etwa $^1/_2$ mm unter die Kupferzylinderfläche zu liegen kommt, sind diese früher als wesentlich empfundenen Mängel praktisch beseitigt.

In den Vereinigten Staaten hat man bereits seit langem den kanadischen Amberglimmer für die Lamellenisolation angewandt, der im mineralogischen Sinne nicht viel weicher als die üblichen hellen oder fleckigen Glimmersorten, aber so mürbe ist, daß er sich an der Kante mit dem Fingernagel leicht zu staubfeinem Pulver zerreiben läßt. Dies ist die einfachste und schnellste Härteprüfung für Glimmer. Der Widerstand, den der Rand einer etwa 0,2 mm starken Glimmerplatte dem Fingernagel bietet, und die Feinheit des entstehenden Pulvers bieten einen guten Anhalt für die Beurteilung der sogenannten Härte des Glimmers.

Der geringe Wärmeausdehnungskoeffizient von $\alpha = 0{,}000003$ bewirkt die große Unempfindlichkeit gegen wechselnde Einflüsse von Wärme und Kälte. Er wird daher an Stelle von Glas mit Vorteil als Schauscheibe zur Beobachtung von Vorgängen in hoch erhitzten Räumen, wie an Hochöfen und Glühöfen und an sogenannten irischen Heizungsöfen verwendet.

Das spezifische Gewicht des Glimmers wird mit 2,76 bis 3,1 angegeben. Die praktische Zahl, die ich oft in praktischen Versuchen nachgeprüft habe, ergab ein spezifisches Gewicht von 2,8. Zur Gewichtsermittlung von Naturglimmerplatten ist eine Zahl von 2,8 bei allen in der Technik vorkommenden Glimmersorten anwendbar und ergibt sehr genaue Resultate.

Die vorerwähnten Eigenschaften sind solche, die dem Glimmer als Kristall eigentümlich sind, und bei der technischen Verwendung des Glimmers sollten Konstrukteur und Betriebsfachmann stets im Auge behalten, daß der Glimmer nicht ein Metall oder ein metallähnlicher Körper ist, sondern ein mineralogisches Kristall. Viele falsche Anwendungsformen werden verschwinden, wenn diese Erkenntnis tiefer eingedrungen sein wird, als dieses jetzt noch der Fall ist.

Digitized by Google

Der Glimmer kristallisiert in ebenen Flächen und nur aus denjenigen körperlichen Flächen, die sich in einfacher Weise aus ebenen Flächen geometrisch herstellen lassen oder durch einfaches Einschneiden (Verjüngen) kann man technisch gut verwendbare Formen gewinnen, bei denen die guten Eigenschaften des Glimmers völlig oder doch zu einem großen Teil ausgenutzt werden.

Der Glimmer ist in der Natur zahlreich verbreitet, jedoch nur an wenigen Fundorten wird Glimmer in solcher Größe gefördert, wie ihn die Technik benötigt. Unter den zahllosen Glimmerarten haben nur drei Arten für die Elektrotechnik Bedeutung, in erster Linie der Muskowit und der Phlogopit, in geringem Maße der Biotit.

Die in Deutschland beliebtesten und am meisten verwendeten Glimmersorten gehören der Klasse des Muskowits an, eines Kalium-

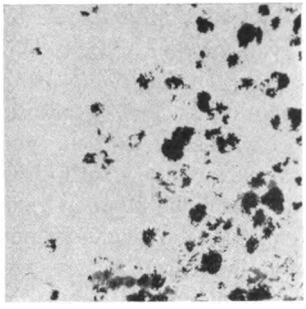


Abb. 2.

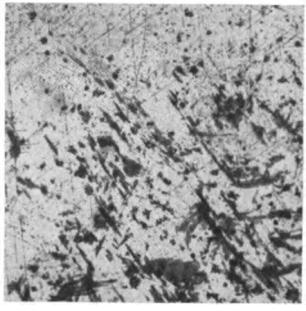


Abb. 3.

Aluminium-Doppelsilikates. Die Färbungen sind rötlich, auch weiß oder grün (in den Schattierungen vom hellsten Grün bis zum dunkelsten Grün) und auch braun, teils klar, teils mit rötlichen oder auch schwarzen Flecken, welche als rundliche Klexe oder vielfach strichförmig in mehr oder minder großer Regelmäßigkeit auftreten (Abb. 2 und 3).

Der Phlogopit (Amber) ist ein wesentlich komplizierteres, chemisch zusammengesetztes Kalium-Magnesium-Aluminium-Eisen-Doppelsilikat und enthält eine geringere Anzahl Molekeln Kristall- oder Konstitutionswasser, als der vorerwähnte Muskowit. Hierdurch dürfte die größere Mürbe, welche sich als Weichheit charakterisiert, hervorgerufen sein. Auch die höhere Temperaturbeständigkeit des Phlogopits dürfte hiermit zusammenhängen. Während der Muskowit unter dem Einfluß von etwa 600 bis 650° Temperatur kalziniert (weißlich wird) und hierdurch sein festes Kristallgefüge einzubüßen beginnt, bleibt der Amberglimmer (Phlogopit) bei diesen Temperaturen noch fast unbeschädigt. Dieses Austreiben des Konstitutionswassers erkennt man durch das Trübewerden des bis dahin völlig durchsichtigen Kristalles. Die höhere

Digitized by Google

Temperaturbeständigkeit (900 bis 1000° C) des Amberglimmers macht ihn daher für die Anwendung in Heizapparaten besonders geeignet.

Die Farbe des Phlogopits ist bernsteingelb bis bernsteinrötlich und variiert vom hellen, klar durchsichtigen Bernsteingelb bis zu nur durchscheinendem Bernsteinrötlichgelb.

Der Biotit ist chemisch sehr kompliziert zusammengesetzt und erheischt nicht das besondere Interesse des Elektrotechnikers. Er kommt auch in großen Kristallen vor; seine Färbung ist fast stets sehr dunkel, meistens völlig schwarz. Infolge dieser tiefdunklen Färbungen sind Einschlüsse nur sehr schwer oder überhaupt nicht zu erkennen. Man hat mit diesem Glimmer sehr viel Mißerfolge gehabt, da sich in den Schichten sehr starke Oberflächenleitfähigkeit zeigt und auch die Durchschlagsfestigkeit senkrecht zur Kristallfläche außerordentlich großen Schwankungen unterworfen ist. Die Gründe hierfür sind metallische, unsichtbare Einschlüsse und mikroskopisch feine Schnitte. Die Prüfung an Stichproben versagt bei diesem Glimmer vollkommen, da die erprobte Güte in einer Schicht nicht die Güte etwa einer im Abstande von nur 0,02 mm liegenden anderen gewährleistet.

Ein bekanntes Vorkommen von Biotit in sehr großen, gut auskristallisierten Platten liegt im Norden von Norwegen in Finmarken. Dort wurden während des Krieges nicht unerhebliche Mengen gefördert. Er kommt sehr häufig auch verwachsen mit Muskowit zusammen vor, wird aber schon in den Gruben als Abfall beseitigt.

Die Hauptproduktionslander von Glimmer sind Britisch-Indien, in zweiter Linie Kanada, in dritter Linie die Vereinigten Staaten von Nordamerika, die jedoch für den Export nach anderen Ländern nicht in Frage kommen. In weitem Abstande folgen alsdann in vierter Linie: Deutsch-Ostafrika, Brasilien, Argentinien, Britisch-Südafrika, Madagaskar, Norwegen, deren Gesamtproduktion bei weitem noch nicht selbst diejenige von den Vereinigten Staaten erreicht.

In Britisch-Ostindien wird der Glimmer in drei voneinander räumlich weit getrennten Hauptgebieten gefunden. Man unterscheidet hiernach Kalkutta-Glimmer, Bombay-Glimmer und Madras-Glimmer. Diese Sorten sind nach ihren geographischen Mittelpunkten benannt und unterscheiden sich voneinander zum Teil recht erheblich, gehören aber sämtlich der Muskowitart an.

In den Vereinigten Staaten von Nordamerika wird gleichfalls fast ausschließlich Muskowit gefunden. Die Produktion beträgt etwa $^1/_3$ bis $^1/_4$ derjenigen der indischen. 48% der Produktion in U. S. A. entfallen auf Carolina, etwa 39% auf New Hampshire.

Dieser Glimmer der U. S. A., dort home mica oder domestic mica genannt, wird von der amerikanischen Industrie vollkommen aufgenommen. Er ist im allgemeinen von recht guter, heller und klarer Qualität.

Digitized by Google

Die kanadische Produktion ist etwa derjenigen in U. S. A. der Menge nach gleich. Im allgemeinen aber sind die dort gefundenen Glimmersorten in der Größe kleiner. Fast der gesamte in Kanada gefundene Glimmer gehört aber nicht der Muskowitart, sondern der Phlogopitart an, ist also bernsteingelber Glimmer. Der bei weitem größte Teil dieses kanadischen Amberglimmers, wie er im allgemeinen genannt wird, wird an die Vereinigten Staaten geliefert.

Seit dem Jahre 1919 ist die Förderung von Glimmer in Deutsch-Ostafrika eingestellt. Die Produktion Argentiniens dagegen, ebenso wie die Brasiliens hat sich stark gehoben, insbesondere sind in den Jahren 1919 bis 1922 so erhebliche Mengen Blockglimmer zum Versand gelangt, daß sie für die Weltproduktion eine Rolle spielen.

Da die Preise für Blockglimmer besonders im Jahre 1920 außerordentlich hoch waren, war die Produktion auch für Südamerika sehr lohnend. Das Nachlassen der Hochkonjunktur in der Weltwirtschaft hatte ein Sinken der Glimmerpreise besonders der größeren Dimensionen zweiter Qualitäten zur Folge und die Förderung ließ sehr bedeutend nach, so daß im Jahre 1921 bereits der Versand aus Südamerika fast bedeutungslos wurde.

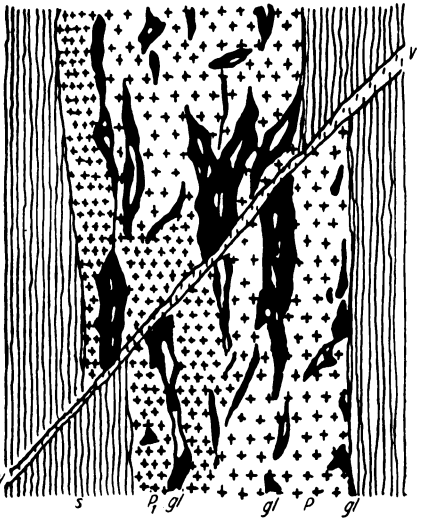


Abb. 4. *gl* Glimmer, *s* Glimmerschiefer, *P* Pegmatit, P_1 Quarz im Pegmatit, *V* Verwerfung.

Im Jahre 1922 jedoch gelang es die Gestehungskosten herabzudrücken und auf dem Weltmarkt erfolgreich zu konkurrieren.

Im Jahre 1920 erlangte zum ersten Male in erheblichem Maße ein Vorkommen auf der französischen Insel Madagaskar Bedeutung. Es wurden dort Läger gefunden und ausgebeutet, welche einen besonders schönen Amberglimmer (Phlogopit) ähnlich dem kanadischen Amberglimmer lieferten. Ein abschließendes Urteil kann nach so kurzer Zeit nicht gefällt werden. Es ist möglich, daß es sich um Schürfungen größerer Adern handelt oder auch nur um die Erschließung von Nestern. In letzterem Falle wäre mit einem schnellen Versiegen zu rechnen, während im erstgenannten sehr wahrscheinlichen Falle eine dauernde größere Produktion zu erwarten ist.

Das geologische Vorkommen des Glimmers ist durchaus nicht ein-

Digitized by Google

heitlich, im allgemeinen kommt Glimmer in Pegmatitgängen vor. Pegmatit ist eine Art Granit von außerordentlicher Grobstückigkeit. Die Bestandteile des Granits wie des Pegmatits sind Feldspat, Quarz und Glimmer (Abb. 4). Diese Grobheit nimmt zuweilen derartige Formen an, daß vollkommen auskristallisierte Kristalle in diesem Pegmatit vorkommen. Trifft dieser Fall zu, so hat man es eben mit einem Glimmergange zu tun. Er kommt deswegen meist in Gemeinsamkeit mit Feldspat, eben dem Bestandteil des Pegmatits, vor.

Die wichtigsten Ausnahmen größerer Glimmervorkommen von der vorgenannten Regel sind Schwemmlager von Madras, bei denen es sich um Anschwemmungen aus dem Gebirge zu handeln scheint.

Der Wert des Glimmers ist von zwei Faktoren abhängig. Der erste, die Größe, läßt sich eindeutig bestimmen und bei einiger Übung von jedem feststellen. Der zweite Faktor ist die Qualität, zu deren Bestimmung eine große Erfahrung gehört, da es einfache Bestimmungsmethoden hierfür nicht geben kann. Für die Qualität sind maßgebend:

1. die Grundfarbe,
2. die Reinheit,
3. die Fehlerfreiheit des Kristalls.

Der beste Glimmer soll hellrosafarben bei etwa 0,1 mm Stärke schimmern, frei von Einschlüssen sein, außerdem vollkommen eben und rissefrei. Der geringste Glimmer ist rötlich bis dunkelgrünlich oder auch braun in der Grundfarbe, durchsetzt mit schwarzen Streifen (Rutilnadeln) oder auch schwarzen Flecken, außerdem rötlich gefleckt (Oxydeinschlüsse von Eisen und ähnlichen Verbindungen) nicht ganz eben, zum Teil etwas wellig und auch vielleicht sonst noch mit Einrissen behaftet.

Zwischen diesen beiden Grenzen gibt es nun die ungeheure Zahl der Zwischenfälle.

Für die Starkstromtechnik wird meist gefleckter Glimmer, schwarz- und rotgefleckt, verwendet. Für die Kollektorisolation zwischen den Kupferlamellen und auch für Bandagenzwecke und alle diejenigen Verwendungsarten, welche den Glimmer auf Durchschlag beanspruchen, genügt schwarzgefleckter Glimmer vollkommen, wie die nachstehenden Prüfungszahlen zeigen werden. In allen denjenigen Fällen jedoch, bei denen auch geringe Spuren von Oberflächenleitfähigkeit schädlich sind, muß man entweder zu klarem Glimmer (z. B. für Zwecke der drahtlosen Telegraphie) oder auch zu nur rötlich gefleckte Glimmer (z. B. für Meßinstrumente, Widerstände) greifen. Es ist eine irrige Ansicht, daß die rötlichen Flecke gewöhnliches Eisenoxyd sind und leiten. Die bekannten rötlichen Flecke weisen sehr hohen elektrischen Widerstand auf und auch die Prüfungsstellen auf Durchschlag an den roten Stellen weisen gute Prüfungszahlen auf.

Digitized by Google

Die ganz schweren rötlichen Flecke mit weißlichem Schillern deuten auf eine Verrottung des Glimmers an dieser Stelle und da der Glimmer an diesen Stellen mulmig weich ist, so kann bei nicht genügender Stärke der gewählten Glimmerschicht allerdings an solchen Stellen, infolge seiner mechanischen Schwäche, leicht ein Durchschlag erfolgen. Man soll daher derartig ganz schwer rotgefleckten Glimmer nur in Stärken von mindestens 0,2 mm gebrauchen.

Die Größe des Glimmers wird handelsüblich eingeteilt nach der Flächengröße der herausschneidbaren rechteckigen Platten; nach ihr richtet sich der Preis, wie die folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 1.

Bezeichnung	Größe		1. Klar Ia		2. Ganz leicht rotfleckig oder IIa klar		3. Rotfleckig (stained)	
	□″	□cm	Juni 1914 sh/d	Sept. 1920 sh/d	Juni 1914 sh/d	Sept. 1920 sh/d	Juni 1914 sh/d	Sept. 1920 sh/d
Extra	mehr als 48	315	16/6	60/—	13/9	45/—	9/7	24/—
Ia	36—47¾	235—314	12/10	42/—	10/7	28/—	8/1	16/—
I	24—35¾	156—235	10/8	34/—	9/3	20/—	7/4	12/—
II	15—23¾	97—154	9/3	30/—	7/4	19/—	6/8	10/—
III	10—14¾	65—96	7/9	26/—	6/9	16/—	6/—	6/6
IV	6—9¾	39—64	6/1	20/—	5/2	12/—	3/7	4/3
V	3—5¾	19—38¾	4/5	11/6	2/11	10/—	1/6	3/3
VI	1½—2⅞	10—18	1/2	3/6	—/10	1/3	—/6	—/6

Die angegebenen Preise sind zu verstehen in Shilling für 1 engl. Pfund von etwa 453 Gramm. sh. 1/— zur Friedensparität = 1,02 Mark.

Die vorstehende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über drei Normalqualitäten von Glimmer, nämlich

1. klaren, reinen, guten Kalkutta-Glimmer mit der Bezeichnung „clear“,
2. ganz leicht fleckige Ware, welche in dünnen, d. h. ungefähr 0,10—0,15 mm starken Platten auch noch den Eindruck eines klaren Glimmers macht, bei genauerem Hinsehen jedoch bereits leichte rötliche Wolkenflecke aufweist. Bei stärkeren Stücken treten diese als leichte rötliche Flecke deutlicher vor das Gesicht. Diese Qualität wird mit „slightly stained“ bezeichnet,
3. die rotgefleckte Qualität, bei welcher diese rötlichen Flecke in stärkerem Grade auftreten und ganz deutlich auf der 0,10 bis 0,15 mm starken und im übrigen klar durchscheinenden Platte erscheinen, ohne daß jedoch auf dieser dünnen Platte die Durchsicht allzu wesentlich auch an den roten Flecken beeinträchtigt wäre. Diese Qualität wird mit „stained“ bezeichnet.

Digitized by Google

Vor dem Kriege wurden diese Qualitäten im Durchschnitt von den indischen Gruben mit größeren oder geringeren Abweichungen innegehalten, ohne daß jedoch diese Abweichungen etwa zu stark aus der Qualitätsbezeichnung herausfielen. Nach dem Kriege und schon in der letzten Zeit während des Krieges hat sich hierin leider ein Umschwung zuerst bei den indischen Gruben, dann aber auch bei allen anderen Fundstätten immer stärker herausgebildet, so daß man heute mit den friedensmäßigen Qualitätsbezeichnungen nicht mehr in der Lage ist, die aus den Ursprungsländern kommende Rohware zu bezeichnen. Die Unterschiede sind zahlreicher geworden. Man unterscheidet allein bei der stained-Qualität mindestens 3—4 Qualitätsunterschiede, ohne daß etwa hierdurch die Genauigkeit der Sortierungen, wie man eigentlich erwarten müßte, besser geworden wäre. Infolgedessen sind die in der Tabelle 1 angegebenen Preise vom September 1920, um einen Vergleichsmaßstab mit den Vorkriegspreisen zu gewinnen, derart umgerechnet worden, daß sie der friedensmäßigen Qualität der im September 1920 geltenden Preise entsprechen.

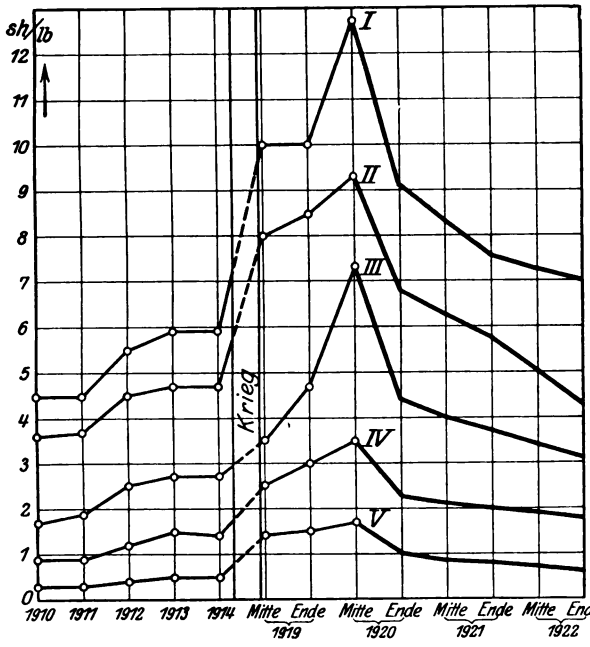


Abb. 5.

Ganz allgemein zeigt sich ein außerordentlich hohes Anwachsen der englischen Preise für die größeren Dimensionen und die besten Qualitäten, während die Preise der geringsten Qualität und der kleinsten Größen den Friedenspreisen ungefähr gleich sind.

Die Gestaltung der Preise für die mehr einheitliche schwarzfleckige, sogenannte elektrische Ware während der letzten elf Jahre, also von 1910 bis etwa Mitte 1921 zeigt die Abb. 5 mit dem außerordentlich scharfen Sturz der englischen Preise während des Jahres 1920/21, hervorgerufen durch die ungünstige weltwirtschaftliche Lage der Elektrotechnik in dieser Zeit. In diesem Schaubild ist die kleinste

Digitized by Google

Größe Nr. 6 fortgelassen, deren heutiger Preis etwa dem Friedenspreise gleich ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Preise sowohl in den Schaubildern, als auch in der Tabelle in englischer Währung gegeben sind, welche gegenüber der dem Goldstandard fast paritätischen Dollarwährung der U. S. A. etwa um 20% zurückbleibt. Das bedeutet also, daß die aufgezeichneten Preise um 20% reduziert werden müßten, um sie mit dem Goldwertstandard, wie er im Frieden gültig war, vergleichen zu können.

Abb. 6 zeigt die indische Glimmerausfuhr für die Jahre 1913 bis 1918 nach den indischen Statistiken und zwar sowohl nach der Menge, als auch nach den Werten. Man erkennt die sehr starke Wertsteigerung, die sich nach dem Kriege noch erheblich verschärft hat, in bezug auf die gleiche Glimmermenge.

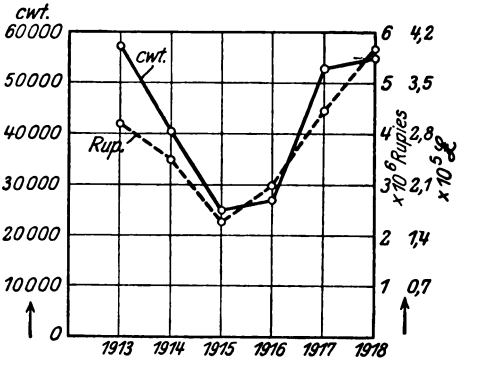


Abb. 6.

Die Statistiken der anderen Länder sind nur unvollkommen und lassen sich leider zum Vergleich nicht heranziehen.

Ein außerordentlich großer Anteil der Ausfuhr entfällt auf Glimmerspalt (splittings), das Ausgangsmaterial für die Mikanitfabrikation. Schätzungsweise dürfte die Ausfuhr von Glimmerspalt mehr als die Hälfte der Gesamtausfuhr betragen.

Die Vorzüge des Glimmers als Isoliermaterial in der Elektrotechnik bestehen in seiner hohen Durchschlagsfestigkeit und in der Unveränderlichkeit dieser Durchschlagsfestigkeit bei allen in der Elektrotechnik praktisch vorkommenden Temperaturen. Erst in der Nähe des Kalzinierungspunktes, also bei etwa 650° sinkt wie schon vorher bemerkt die Durchschlagsfestigkeit des Glimmers.

Die Tabelle 2 (S. 94) gibt einige Prüfungsresultate für Prüfungen in Luft und Öl.

Die beste Sorte Glimmer „Prima klar Ruby" zeigt das merkwürdige Ergebnis, daß mit größerer Stärke des Glimmers der Durchschlagswert pro Millimeter ganz beträchtlich sinkt. Diese Prüfungen lassen sich nur unter Öl vornehmen, da schon bei 0,12 mm starken Platten die Coronabildung und damit die Überschlagsgefahr so groß ist, daß eine Prüfung in Luft selbst bei großen Platten nur noch schwer ausführbar ist.

Die Messung wurde einheitlich vorgenommen mit Elektroden von 50 mm Φ. Die Kanten hatten einen Abrundungsradius von 5 mm.

Digitized by Google

Tabelle 2.

Glimmersorte	Stärke	in Luft		in Öl	
		gem. KV.	KV/mm	gem. KV.	KV/mm
Ia Ruby klar	0,055	10,5	191	4,9	89
	0,12			5,3	44
	0,28			7,6	27
	0,4			9,5	24
	1,0			13,5	13,5
Kalkutta schwer rotfleckig. . .	0,11	7000	64	6700	60
Kalkutta schwarzfleckig streifig .	0,11	5200	47	6000	54,3
Madras schwarz-rundfleckig . .	0,10	6800	68	6300	63

Der Durchschlagspunkt erfolgte regelmäßig, wie zu erwarten ist, an der Kante.

Die Dielektrizitätskonstante des Glimmers beträgt 4,5 bis 5,5. Der Tangens des Verlustwinkels beträgt $2 \cdot 10^{-4}$ bis $10 \cdot 10^{-4}$. Die entsprechenden Zahlen für Mikanit seien an dieser Stelle gleich mit aufgeführt.

Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 3{,}3$

$\operatorname{tg} \delta = 0{,}0025$ bei 2000 V.
$\operatorname{tg} \delta = 0{,}067$ bei 3000 V.
$\operatorname{tg} \delta = 0{,}116$ bei 4000 V.[1])

Die Oberflächenleitfähigkeit ist im Verhältnis zu der Durchschlagsfestigkeit groß. Bei klarem Glimmer ist sie in Luft zum weitaus größten Teile auf feine Feuchtigkeitsniederschläge zurückzuführen. Bei schwarzfleckigem Glimmer können häufig Adern mit einer Leitfähigkeit, welche ganz erhebliche Ausschläge des Spiegelgalvanometers hervorrufen, festgestellt werden.

Der Glimmer ist ferner ein außerordentlich schlechter Wärmeleiter. Genaue Zahlenangaben hierüber können nicht gegeben werden. Seine spezifische Wärme beträgt ungefähr 0,2.

Die Verarbeitung des Glimmers erfolgt durch Spalten in Spaltungsebene auf gleichmäßige Stärke mittels schmaler, etwa 7 cm langer Messer. Das Schneiden zu Platten gegebenen Formates erfolgt entweder mittels Schlagscheren oder mittels Stanzen. Da der Wert des Glimmers mit der Größe erheblich steigt, so ist es im allgemeinen unrentabel, aus großem Glimmer kleine Formate zu stanzen oder zu

[1]) Diese Zahlen sind in der Phys.-Techn. Reichsanstalt bei Wechselstrom von 50 per/sec festgestellt.

Digitized by Google

schneiden, da der Mehrwert für die Größe des Glimmers den Arbeitslohn übersteigt, der durch Vielfachstanzen scheinbar erzielt wird.

Die äußere Form, in der der Rohglimmer in den Handel kommt, ist die polygonale Form. Der polygonale Glimmer ist unregelmäßig mit einem Sichelmesser zugeschnitten, wobei die Kanten nicht senkrecht zu der Spaltebene des Glimmers, sondern schräg hierzu, wegen der leichteren handmäßigen Bearbeitung, geschnitten sind; daher auch der englische Name für derartigen polygonalen Glimmer „sickle trimmed". In neuerer Zeit ist auch noch das Schneiden in unregelmäßige Polygonen mittels Schlagschere oder Handschere hinzugetreten, welches gewöhnlich fünf- oder sechseckige, seltener mehreckige Polygone ergibt. Diese Zubereitung wird auch „Scherenschnitt", englisch „scissor-cut", genannt.

Diese beiden Zubereitungsarten sind allgemein in fast allen Produktionsländern, mit Ausnahme von Madras, üblich. Der bei weitem größte Teil des aus dieser Gegend stammenden Glimmers ist äußerlich dadurch gekennzeichnet, daß er viereckig zugeschnitten ist. Diese Vierecke sind meist beinahe rechtwinklig. Die kleineren Sorten werden in Madras auch häufig eirund geschnitten.

B. Glimmererzeugnisse.

Mikanit.

Unter Mikanit versteht man ein Glimmer-Kunstmaterial, welches aus allerfeinst gespaltenen Glimmerplättchen unter Beifügung von Bindemitteln zu Platten oder Formstücken zusammengepreßt ist. Man ist durch geeignete Wahl des Glimmers und der Bindemittel in der Lage, eine Anzahl von Mikanitsorten herzustellen, welche den jeweiligen Verwendungsbedürfnissen angepaßt sind.

Mikanit wurde zuerst in den Vereinigten Staaten von Amerika hergestellt auf Grund eines dem Amerikaner Munsell erteilten Patentes der Vereinigten Staaten von Nordamerika. Auch in Deutschland war im Jahre 1893 ein deutsches Reichspatent erteilt worden, welches aber beschränkte Gültigkeit gehabt hat, da es durch seine, infolge Übersetzungsfehlers vollkommen mißverständliche Fassung in seinem Hauptbestandteil wertlos geworden war.

Infolge der mit steigender Glimmergröße stark anwachsenden Preise hatte sich das Bestreben geltend gemacht, die Fläche künstlich zu vergrößern. Man hatte, als man z. B. Kollektorlamellen von 700 × 80 mm benötigte, Glimmer von 400 mm Länge und 80 mm Breite und solchen von 300 mm Länge und 80 mm Breite auf etwa 0,2 mm Stärke gespalten und in vier Lagen paarweise mit überlappten Stoßstellen mittels dünner Schellacklösung so zusammengeklebt, daß nunmehr 700 × 80 mm große zusammengesetzte Lamellen verwendet

Digitized by Google

werden konnten. Da auch Glimmer von 300 mm Länge selten ist, führte man den Gedanken der Unterteilung weiter. So kann man Platten folgendermaßen herstellen. Fein gespaltener Glimmer von etwa 0,02 mm Stärke wird reihenweise schuppenartig zu einer Fläche gelegt. Diese Glimmerlage wird mit Schellacklösung bestrichen, eine weitere Lage gelegt und dieses Verfahren solange fortgesetzt, bis die gewünschte Stärke erreicht ist. Der hierzu verwendete Spaltglimmer besitzt die Größe Nr. 5 oder 6, also eine Fläche des einzelnen Glimmerblättchens von etwa 28 bzw. 14 qcm. Wenn man eine derart hergestellte frische Materialplatte durch heißes Pressen von dem Lösungsmittel befreit, erhält man eine feste, zusammenhaftende Platte, welche stärkeren, mechanischen Beanspruchungen standhäit.

Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß derartige Platten ganz erheblich billiger sind, als Glimmer selbst schon von der Größe Nr. 3.

Auf dieser Grundmethode aufbauend stellt man nun Platten verschiedener Art her.

1. Weißmikanit für Kollektoren. Der Aufbau der Glimmerlagen wird nach der oben beschriebenen Grundmethode vorgenommen, jedoch sehr dünne Lacklösungen verwendet, welche gerade noch ein festes Aneinanderhaften der Glimmerplättchen ermöglichen. Diese Platten werden möglichst frisch, in hydraulischen Pressen unter hohem Drucke von etwa 70—80 kg pro qcm gepreßt. Die Pressen sind heiz- und kühlbar, so daß durch das Pressen einerseits der überschüssige Lack herausgequetscht wird, während andererseits der Spiritus ausgast und der zurückgebliebene, zur Bindung erforderliche Schellack infolge der Wärmeeinwirkung fest wird. Die Presse wird dann nach Beendigung der Preßdauer, sobald keine Ausdünstungen mehr erfolgen, gekühlt und die Tafel herausgezogen. Bei der Wahl richtigen Glimmerspaltes und richtiger Lackmischungen soll die Platte klanghart sein. Da das Kollektormikanit sehr genaue Stärken besonders in Kollektoren von Wendepolmaschinen haben muß, um eine vollkommen symmetrische Kommutatorteilung zu erzielen, müssen diese Platten nunmehr geschliffen werden. Das Schleifen wird mehrere Male wiederholt, bis die Platte auf jeder Stelle die deutlichen Merkmale des Schleifens hat. Hierzu ist je nach der Ungleichheit der Platte eine mehr oder minder große Anzahl von Arbeitsgängen oder Stichen, wie man es im Walzwerkverfahren nennt, erforderlich. Je nach der Genauigkeit, mit der die Platten ursprünglich geklebt worden sind, wobei man vollkommen von der Geschicklichkeit der Arbeiterinnen abhängig ist, wird der Schleifabfall größer oder kleiner werden. Bei ausgezeichnet geklebten Platten beträgt der Schleifabfall etwa 10 bis 12% und kann selbst auf 25% bei unregelmäßig geklebten Platten anwachsen.

Digitized by Google

Nach dem Schleifen sind die Flächen aufgerauht. Durch nochmaliges Pressen erzielt man eine verhältnismäßig glatte Oberfläche. Vielfach ist es erwünscht, eine oder beide Seiten mit einem ganz dünnen Seidenpapier zu beziehen, um das spätere Aufrauhen und Abblättern der Oberfläche bei unvorsichtiger Behandlung insbesondere der zugeschnittenen paketierten Lamellen zu beheben.

Der einseitige Bezug von Seidenpapier ist völlig ausreichend. Gleichgültig, ob das Weißmikanit einen Überzug besitzt oder nicht, es muß sich beliebig schneiden und stanzen lassen, ohne abzusplittern.

Das Schleifen der Platten geschieht mit einer Genauigkeit von $\pm$ 0,02 mm, so daß also eine 0,8 mm starke Platte zwischen 0,78 und 0,82 mm messen soll. Da das Schleifen bei einer Schleifbreite von 1 m und mehr Maschinen von ganz außerordentlichen Dimensionen, die in keinem Verhältnis zu den Anschaffungs- und Betriebskosten stehen erforderlich macht, so geht man mit der Schleifbreite nicht wesentlich über 600 mm hinaus. Die Kollektormikanitplatten haben daher gewöhnlich eine Breite, die im lieferungsfertigen Zustande ein wenig unterhalb 600 mm liegt. Die übliche Länge derartiger Platten ist etwa 1000—1100 mm. Die Länge der Platten wird naturgemäß durch das Schleifen nicht beschränkt, sondern nur durch die Dimensionen der hydraulischen Presse.

Die geringste Stärke dieser Platten ist etwa 0,25 mm; ein Schleifen ist jedoch nur möglich bis zu etwa 0,3 mm herab und bereitet schon bei dieser Stärke Schwierigkeiten. Das Schleifen von 0,4 mm starken Platten ist anstandslos möglich. Die größte übliche Stärke ist 1,5 mm; gelegentlich auch noch 2 mm. Die in früheren Jahren häufig vorkommenden größeren Stärken werden jetzt nicht mehr benötigt, da die Hartpapierfabrikate in allen den Fällen einen ausgezeichneten Ersatz bieten, bei denen nicht Temperaturen auftreten, welche auf das Papier zerstörend einwirken.

Das derartig hergestellte Weißmikanit soll einen Bestandteil an Organischem von ungefähr 2% besitzen. Die Nachprüfung erfolgt entweder durch Verseifung, Extraktion oder schneller und ebenso genau durch Veraschung.

2. Braunmikanit wird das Glimmer-Kunsterzeugnis genannt, welches im Gegensatz zu den Weißmikanittafeln einen höheren Schellackgehalt besitzt und diesem auch seine braunrote Farbe verdankt. Man stellt eine weniger schellackhaltige Art „Hartbraun" oder „Stanzbraunmikanit" genannt und eine schellackreichere Art „Formmikanit" oder „Braunmikanit formbar", im englischen „moulding micanite", genannt her. Die Herstellung dieses Plattenmaterials ist nicht so schwierig, weil der erheblichere Schellackgehalt ein sicheres Binden und eine mechanische Festigkeit der Platten fast stets gewährleistet. Die

Digitized by Google

Anforderungen an die Genauigkeit müssen allerdings bei diesen Qualitäten, wie auch bei den nachfolgend zu besprechenden, herabgemindert werden. Größere Abweichungen sind unausbleiblich. Allerdings ist auch bei diesen Braunmikanitqualitäten ein Schleifen möglich. Man wird derartig geschliffenes Formmikanit wohl nur in denjenigen Fällen benutzen, wo man im Wicklungsraum besonders beschränkt ist, um die aus dem Formmikanit hergestellten Rinnen oder Rohre mit ganz präziser Wandstärke zur vollen Ausnutzung des Wicklungsquerschnittes anfertigen zu können. Der Konstrukteur soll sich aber vergegenwärtigen, daß er durch das Schleifen dieser gewöhnlich nur 0,4—0,5 mm starken Platten das natürliche flächige Gefüge des Glimmers verletzt und den Durchschlagswert wesentlich herabsetzt. Bei Weißmikanit ist diese oberflächige Gefügestörung bedeutungslos, weil bei den gewöhnlichen Stärken von 0,6 mm an aufwärts die innere, nicht anzugreifende Isolationsschicht bereits eine vielfache Sicherheit in sich birgt.

Die Verarbeitung des Hartbraunmikanits erfolgt mittels Stanzen und Schneiden an Schlag- oder Kreisscheren oder auch mit gewöhnlichen Messern, bei kleineren Stücken auch mit kräftigen Handscheren, um die für die Unterlagszwecke erforderlichen Formate zu erhalten.

Infolge seines Schellackgehaltes kann man aber auch Krümmungen mit einem Radius von etwa 25—30 mm und mehr mit diesem Material noch bequem ausführen. Bei kleineren Radien liegt die Gefahr des Abspaltens der oberen Glimmerlagen vor.

Wünscht man das Mikanit zu genaueren Fassonteilen zu verarbeiten, scharfkantige Rinnen, Rohre oder Rundrohre kleinen und kleinsten Durchmessers herzustellen oder Kappen mit gebogenen Ecken oder Kollektorringe, so soll man sich unbedingt des schellackreicheren Formmikanits (moulding micanite) bedienen. Dieses Mikanit wird vorher auf das erforderliche Maß zugeschnitten, am besten auf Dampf- oder elektrisch geheizte Wärmeplatten gelegt (welche man aber auch notfalls mittels Gas erwärmen kann) derart, daß das Mikanit möglichst keine höhere Erwärmung als 100—110° erhält. Innerhalb weniger Minuten wird die Platte lappig und kann nun in diesem Zustande in die vorbereitete Form gepreßt werden. Bei einiger Übung wird man sehr schöne, exakte Formstücke erhalten.

Bei dieser Gelegenheit sei erwähnt, daß sich für den vorbeschriebenen Zweck noch besser das später in seiner Grundform zu beschreibende Mikafolio, welches auch zu Platten gepreßt bezogen werden kann, verarbeiten läßt. Der auf den beiden Oberflächen befindliche Papierbezug erleichtet dem Verarbeiter die Handhabung außerordentlich. Einerseits wird sicher ein Abspalten des Glimmers beim Biegen um

Digitized by Google

sehr scharfe Kanten bei nicht genügender Schnelligkeit verhindert, außerdem aber verzögert der Papierüberzug das Erkalten beim Einpressen in eiserne Formen. Infolgedessen werden, wenn der Arbeiter nicht über eine gute Übung verfügt, bei der Verwendung eines derartigen Mikafolios in Platten die Formstücke sauberer und präziser, als bei dem ungeschützten Formmikanit. Die Anwendung ist in Deutschland noch nicht sehr verbreitet, während sie in den Vereinigten Staaten von Amerika seit etwa acht Jahren sehr stark in Aufnahme gekommen ist.

3. **Flexibelmikanit** wird für einfachere Arbeiten, sowohl als Unterlage auf geraden Flächen, insbesondere aber auch bei Auskleidungen von gebogenen Flächen oder Rinnen angewandt. Im Gegensatz zu Braunmikanit oder dem Mikafolio in Platten ist bei Flexibelmikanit eine Erwärmung nicht nötig, da es in kaltem Zustande genügend biegsam ist. Zum Schutze gegen das Abblättern wird in den allermeisten Fällen eine zweiseitige Auflage von feinstem Seidenpapier oder auch Japanpapier gewählt. Die dünnen Seidenpapierlagen haben keinen allzu wesentlichen Einfluß auf die Stärke, da sie insgesamt nur ungefähr 0,03 bis höchstens 0,05 mm Gesamtstärke haben. Derartig hergestelltes Flexibelmikanit mit zweiseitiger Papierauflage nennt man Mikanitpapier.

Man hat früher auch vielfach Überzüge mit Leinen einseitig oder auch zweiseitig vorgenommen, jedoch wird der Anwendungsbereich dieses Mikanitleinens immer geringer, da Ölleinen dem Mikanitleinen in sehr vielen Fällen den Rang abläuft.

Das Flexibelmikanit und seine Abarten werden meistens nur in dünnen Stärken hergestellt. Die gangbarsten Stärken sind 0,25—0,4 mm. Auch die Anfertigung in Bändern von 10 mm Breite an aufwärts ist möglich, die in Längen von 50—100 m zu Ringen aufgespült werden.

In neuerer Zeit bedeckt man auch eine Lage feinsten großen Glimmers mit reiner Japanseide, um ein nur 0,08 bis höchstens 0,10 mm starkes wickelbares Isolationsmaterial zu erhalten, welches im Gegensatz zu Ölseide auch gegen höhere Temperaturen widerstandsfähig ist, sich sehr gut schmiegt und nicht aufträgt. Man nennt dieses Fabrikat Glimmerseide. Der Lackgehalt dieser Glimmerseide ist gering und beträgt nur etwa 4—6 Gewichtsprozent, während bei den übrigen Flexibelsorten mit 15—20% Lackgehalt gerechnet werden muß. Nur ganz dünne Flexibelsorten von etwa 0,2 mm Stärke lassen sich mit etwa 12 Gewichtsprozent Lackgehalt herstellen. Infolge seines hohen Lackgehaltes ist Flexibelmikanit für Heiz- und Kochapparate nicht oder nur in sehr beschränktem Maße verwendbar. Ersetzt man jedoch bei der vorher beschriebenen Glimmerseide die Japanseide durch feines Seidenpapier, so kann man ein Heizglimmer-

Digitized by Google

papier erhalten, welches selbst hohe Ansprüche seitens der Heiztechnik erfüllt. Hierbei kann der Lackgehalt sogar auf 3—5% herabgedrückt werden.

4. Heizmikanit. Die elektrische Heiztechnik stellte an die Isolationstechnik die Anforderung, ein elektrisch gut und sicher isolierendes Mittel bereit zu stellen, welches sowohl in kaltem Zustande, als auch bei Temperaturen bis zu 600° seinen Isolationszustand und seine Durchschlagsfestigkeit bei den vorkommenden Spannungen, im allgemeinen bis 440 Volt, nicht mindert. Die Stärke dieses Isolationsmittels muß so gering als möglich sein, damit die von den Heizwicklungen ausstrahlende Wärme möglichst verlustlos auf den die Wärme nach außen hin abgebenden Eisen- oder Blechkörper übertragen wird.

Zuerst war das gegebene Material der Naturglimmer. Die großen Mengen und außerdem die größer werdenden Flächenmaße drängten aber dazu, ein Ersatzmaterial zu finden, welches sich im Preise günstiger stellt als Naturglimmer, ohne aber die vorstehenden Forderungen zu verletzen.

Das Heizmikanit ist nun dieses geforderte Produkt. Während man aber bei Naturglimmer mit einer Stärke von 0,12—0,15 mm für die Deckplatten der Heizelemente und für die Elementträger mit 0,15—0,20 mm Stärke auskommt, ist man gezwungen, bei der Anwendung von Heizmikanit größere Stärken zuzulassen, da Heizmikanit in solch geringen Stärken nicht die genügende Festigkeit besitzt. Man soll daher Heizmikanit unterhalb einer Stärke von 0,3 mm nicht benutzen. 0,3 und 0,4 mm Stärke sind die gangbarsten Maße; 0,5 mm wird schon bei weitem seltener angewandt, stärkere Maße kaum noch hergestellt.

Der Lackgehalt eines guten Heizmikanits soll 1,5 Gewichtsprozent nicht überschreiten.

Der Nachteil des Heizmikanits gegenüber dem Naturglimmer liegt in dem rauchenden Entweichen der organischen Bindestoffe. Es ist daher unbedingtes Erfordernis, daß vor dem endgültigen Einbau entweder die fertigen Elemente in einem Heizofen entgast werden oder unter Einschaltung des Nutzstromes die Entqualmung vorgenommen wird. Nach wenigen Minuten ist kaum noch eine Rauchentwicklung zu bemerken und tritt auch später im Betriebe nicht mehr auf. Durch Verwendung besonders geeigneter Lackmischungen kann man dahin wirken, daß keine übelriechenden Dämpfe entwickelt werden. Da bei der Fabrikation von Weißmikanit, welches äußerlich dem Heizmikanit außerordentlich ähnlich ist, auf diesen Punkt kein Wert gelegt zu werden braucht und man aus anderen Gründen zur Erzielung größerer Festigkeiten Lackmischungen in Anwendung bringt, welche häufig

Digitized by Google

unangenehm riechende Gasentwicklungen zur Folge haben, so soll man nicht ohne weiteres Weißmikanit an Stelle von Heizmikanit verwenden.

Das Schleifen des Heizmikanits ist nicht zu empfehlen. Bei der dünnen Stärke von 0,3 mm zerstört man das Gefüge und kann sehr leicht Durchschläge erhalten, selbst wenn die erste Prüfung bei viel höherer Spannung ein gutes Resultat ergeben hat, da die geringsten Verschiebungen im Heizkörper noch nachträglich feine Spalten oder kleinste Löcher entstehen lassen, welche der Spannung den Weg zum Ausgleich geben. Es ist daher unzweifelhaft ratsam, lieber kleinere Abweichungen in der Stärke von $\pm 0{,}1$ mm zuzulassen. Selbst schwache Stellen, die unter Umständen nur 0,15—0,2 mm Stärke aufweisen, bieten eine erheblich höhere Sicherheit, als ein auf genau 0,3 mm Stärke geschliffenes Heizmikanit.

5. Mikafolio oder Mikartafolio wird eine auf endlose Papierbahnen geklebte, einzelne Glimmerschicht, welche mit Lacküberzug bedeckt ist, genannt. Dieses Mikafolio ist zuerst von Haefely in die Praxis eingeführt worden. Es ist mit Hilfe dieses Materials möglich, schablonengewickelte Spulen oder auch Stabwicklungen im Wickeleibetriebe nahtlos zu umwickeln und zu umpressen oder auch die bisher fertig bezogenen Glimmerrohre verhältnismäßig bequem und vor allen Dingen schnell herzustellen. Da in einem guten Mikafolio Papier, Schellacklage, Glimmerlage und Schellackbedeckung in gut abgestimmten Verhältnisse vorhanden sind, so ist keinerlei Hinzutun irgendwelcher Stoffe erforderlich, um die vorgenannten Anwendungen zur Ausführung zu bringen. Das Mikafolio kalt oder leicht angewärmt wird um die schablonengewickelten Spulen oder um das Stabpaket, in dem die einzelnen Stäbe voneinander wieder durch Mikafoliostreifen-Zwischenlagen isoliert sind, von Hand oder auch neuerdings von Maschinen gewickelt, und darnach der umwickelte Teil zwischen beweglichen beheizten Preßbalken dauernd gedreht oder es wird in hierzu eingerichteten Maschinen dieses Plätten unter fortwährender Drehung des Stabes ausgeführt. Nach etwa 5—10 minütigem Umplätten wird der Stab herausgenommen, dessen Isolierhülle jedoch noch nicht am Kupfer gut anliegt. Daher wird der Stab in gasgeheizte Pressen gebracht, in denen man einen Seiten- und Oberdruck wirken lassen kann und auf den richtigen Querschnitt gepreßt. Man kann auch statt der Pressen diese Arbeit in zweiteiligen, der Länge nach geteilten Eisenformen, bei einzelnen vorkommenden Stücken auch zur Not in Holzformen mit genau eingefrästem äußeren Profil vornehmen. Die Form erhitzt man noch praktischerweise, läßt sie alsdann erkalten und erhält z. B. ein außerordentlich hartes, nahtloses Rohr, wenn man statt des Kupferstabes einen herausschlagbaren zweiteiligen

Digitized by Google

Eisenkeil zum Aufwickeln benutzt hatte. Infolge der Erhitzungen geht nämlich Schellack in Verbindungen über, welche einen höheren Erweichungspunkt, als der ursprüngliche Schellack, haben. Ein derartiges mit 2 mm Mikafolio umpreßtes Stab- oder Drahtbündel oder Rohr kann ohne Gefahr des Durchschlags mit 24000 Volt geprüft werden. Der Durchschlagspunkt liegt oberhalb 40 000 bei kurzzeitiger Prüfung, d. h. bei steigernder Spannung bis zu den angegebenen Werten innerhalb einer Minute. Die Vorzüge des Mikafolio sind in folgendem begründet:

Die Papierlage, welche ein dünnes aber zähes und nicht gar zu rauhes Papier sein soll, gestattet eine außerordentlich starke mechanische Zugbeanspruchung, wie sie bei dem Umwickeln und Plätten auftritt. Sie würgt unter dem Einfluß des dauernden Plättens die Glimmerlage immer fester und fester zusammen und bei der gleichzeitigen Erwärmung wird der Schellack teigig und preßt sich in die feinsten Poren hinein und gestattet ein Gleiten zwischen Glimmer und Papierlage. Die obere Schellacklage verursacht ein sofortiges, intensives Verkleben der eingewickelten Glimmerlagen mit der darunter liegenden Papierlage und gestattet wiederum ein Ineinandergleiten dieser beiden heterogenen Stoffe, um sie zu einem untrennbaren quasi-homogenen Endprodukt zu machen.

Bei den bisher beschriebenen Mikanitplatten wird der Glimmer seiner natürlichen kristallischen Natur entsprechend verarbeitet. Das Kennzeichen des Glimmers, das Spalten in ebenen Flächen, findet man in gewissem Sinne wieder. Man baut Platten großen Flächeninhaltes durch Übereinanderreihen und Übereinanderschichten ebener kleiner Glimmerblättchen auf. Man übt also eine Art Synthese, welche im Gegensatz steht zur Analyse, wie ich einmal das Spalten des Glimmers bezeichnen möchte.

Um Formstücke herzustellen, muß man die ebene Fläche verlassen und das Mikanit zu Körpern formen, deren Flächen dreidimensional sind. Daß dieses möglich ist, weiß jeder Elektrotechniker; daß aber die Mikanittechnik nicht beliebig gestaltete Körper schaffen kann, ist leider nicht allgemein bekannt. Es sei daher vorerst besprochen, wo die Grenze der Verarbeitungstechnik liegt.

Alle Formungen ebener Flächengebilde zu körperlichen Flächen durch Aufwicklungen werden sich ohne weiteres herstellen lassen. Es wird dieses auch dann noch möglich sein, wenn die Verschiebungen von Flächenelementen gegeneinander, wie es z. B. bei Kollektorringen vorkommt, gering sind im Verhältnis zur Größe der Glimmerblätter oder der Segmentteilchen, falls man solche aus einzelnen Mikanitsegmenten (Mikanitstreifen) Flächen zusammengesetzt hat.

Eine früher außerordentlich beliebte Konstruktion aus Mikanit,

Digitized by Google

die allerdings in den letzten Jahren sehr stark im Verschwinden begriffen ist, ist in Abb. 7 wiedergegeben.

Es sollte ein Rohr mit drei aufgesetzten Flanschscheiben hergestellt werden derart, daß Rohr und Flanschscheibe aus einem Stück gearbeitet sind; es sollten also die Scheiben nicht einfach aufgesetzt sein. Derartige Stücke lassen sich in Mikanit zwar mit Aufwendung hoher Formkosten und viel Zeitaufwandes herstellen; technischen Wert aber besitzt nach meiner Ansicht selbst das beste Stück nur in geringem Maße. Gerade die elektrisch höchst beanspruchten Stellen weisen die größte mechanische und elektrische Verschwächung auf. Bei dem Punkt *a* z. B. wird das Material aus der Zylinderfläche in die äußere Kreisfläche abgebogen und strebt fächerförmig auseinander. Schon in sehr kurzer Entfernung von der Umbiegung ist nur noch sehr wenig ursprüngliches Material enthalten, da das ursprüngliche Material im Verhältnis zum Quadrate der Radien abnimmt. Man muß also durch neu einzuführendes Material die Lücke ausfüllen und daß dieses an dieser Stelle ganz außerordentlich schwierig ist und nie fehlerlos durchgeführt werden kann, tritt bei näherer Überlegung klar zutage. Auch die Praxis zeigt, daß hier die Fehler unausbleiblich sind. Es werden also die zu isolierenden Spulenkörper in axialer Richtung nur eine schlechte Isolation zueinander haben und die scheibenförmige Trennwand wird nur einen illusorischen Wert besitzen. Hierdurch aber hat man zugleich auch die Durchschlagsfestigkeit des ursprünglichen Zylinders selbst stark geschwächt, da an der Stelle *a* stets kleine Lufträume bleiben werden und außerdem das Material an dieser Stelle besonders schlecht gepreßt wird, so daß also über den Weg der fächerförmigen Auseinanderteilung stets ein Durchschlag durch das im günstigsten Falle nur halb so starke Material zum inneren zu isolierenden Eisenkörper stattfinden wird. Die Praxis zeigt auch, daß an diesen Rändern mit absoluter Sicherheit jedesmal der Durchschlag liegt. Derartige Konstruktionen sind zu vermeiden.

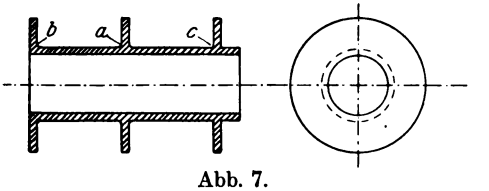


Abb. 7.

Auch die nicht besonders erwähnten Fälle *b* und *c* sind in gleicher Weise unvorteilhaft; der Fall *c* kommt jetzt noch verhältnismäßig häufig vor. Man soll diese Konstruktion stets dadurch vermeiden, daß man Rohre mit aufgesetzten Scheiben nimmt und eine größere Dimension wählt, um klare elektrische Verhältnisse zu haben. Bei den üblichen Anwendungsgebieten der Mikanitformstücke sind die eben besprochenen prinzipiellen Fehler streng vermieden.

Digitized by Google

Die Rundrohre werden aus Formmikanit oder besser aus frisch geklebtem Material über Runddorne bis zur gewünschten Wandstärke aufgewickelt und gebrannt. Das fertige Rohr soll nach dem Beschneiden der überstehenden unregelmäßigen Enden einen hellen, klaren Klang besitzen. Je fester das Rohr gewickelt ist, desto klarer klingt der Ton beim Anschlagen an einen eisernen Gegenstand oder beim Aufstoßen auf einen festen Fußboden.

Die Herstellung der Fassonrohre von anderem als kreisförmigen Querschnitt erfolgt in eisernen Formen mit einem längsgeteilten Eisenkeil, wobei man das Material um die Keile wickelt, bei erreichter Wandstärke in die Form legt, die Keile auf richtiges Innenmaß gegeneinander treibt und die Form brennt. Nach dem Erkalten öffnet man die Form, zieht das Rohr heraus und schlägt die Keile aus. Die auf diese Art hergestellten Rohre sind zwar gegen Erwärmung etwas widerstandsfähiger, als bei der später beschriebenen Herstellungsart, jedoch erfordert diese Herstellung viel Zeit und hat einen sehr erheblichen Nachteil. Derartige Rohre besitzen nämlich in 90% aller Fälle eine Naht; mag nun diese Naht auch klein sein, jedenfalls ist das Gefüge des Glimmers bis auf äußerlich nicht erkennbare Tiefen hinein gestört und gerade bei den Hochspannungsmaschinen, bei denen diese Rohre in größtem Umfange angewendet werden, hat sich dieser Fehler in unliebsamer Weise bemerkbar gemacht. Man ist deshalb immer mehr von dieser Art der Anfertigung zurückgegangen und stellt heute fast nur noch Rohre in nahtloser Ausführung her, indem man nahtlose Rundrohre in die gewünschte Fasson preßt und brennt.

Bei der letzteren Art der Herstellung ist das Auftreten einer Naht nicht möglich. Die Prüfungsresultate werden bedeutend gleichmäßiger.

Man kann derartige Fassonrohre mit einer Betriebsspannung von etwa 2000—2500 Volt pro Millimeter Wandstärke bei den üblichen vorkommenden Spannungen beanspruchen. Wie die Prüfung dieser Rohre vorzunehmen ist, ist immer noch strittig und diese Frage wird wohl auch noch auf lange Zeit hinaus ein besonders schwieriger Punkt bei der Bearbeitung von Prüfvorschriften bleiben. Eine kurzzeitige Prüfung mit hoher Spannung etwa innerhalb einer Minute ist die am meisten angewendete Prüfungsmethode. Die hier gestellten Anforderungen schwanken nun außerordentlich zwischen 7000—12000 Volt pro Millimeter. Ein 2 mm starkes Rohr soll demnach bei der höchsten Forderung mit 24000 Volt geprüft werden. Diese Spannung liegt aber der Durchschlagsspannung bereits auf etwa 2000—4000 Volt nahe, so daß man bei solch hohen Prüfungen das Rohr stark gefährdet, obwohl es der Prüfung standhält. Man kann experimentell zeigen, daß Rohre, die unzulässig hoch geprüft sind und die Prüfung bestanden haben,

Digitized by Google

nach Einschalten mit der halben Spannung teils sofort, teils innerhalb kürzester Frist, d. h. innerhalb einer Minute durchschlagen. Die Prüfungen selbst werden allgemein ausgeführt, indem man das Innere der Rohre mit Kupfer- oder Eisennadeln ausfüllt und die äußere Belegung durch Stanniol bildet. Ein viel zuverlässigeres, mit der Praxis mehr übereinstimmendes Prüfungsresultat erhält man bei der folgenden Prüfmethode, welche die Erwärmung unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zum Maßstabe der Güte des Materials nimmt. Bei dieser Methode soll man nicht Eisennadeln, sondern nur unmagnetisches Material verwenden, da unter Umständen die Wirbelstromverluste eine nicht unerhebliche zusätzliche Erwärmung verursachen. Man stellt hierbei die Anforderung, daß bei der Beanspruchung des Materials mit 6000 Volt pro Millimeter keine höhere Erwärmung eintritt, als 20°. Die Prüfdauer muß dann allerdings $^1/_2$ Stunde betragen, um die stationäre Temperatur zu erreichen. An diesem großen Zeitaufwand scheitert eben die praktische Durchführung. Durch Parallelscheiben einer größeren Zahl von Rohren kann man den Zeitverlust verringern. Hierbei aber ist zu bedenken, daß die Belegungen als Kondensator wirken und durch das Parallelschalten recht erhebliche Kapazitäten auftreten und unkontrollierbare Spannungserhöhungen die Folge sein können. Notgedrungen nimmt man daher die kurzzeitigen Prüfungen vor und wird mit nicht gar zu hohen Spannungen prüfen. Für ein Rohr mittlerer Beanspruchung wird man mit 8000—9000 Volt pro Millimeter Beanspruchung bei der Prüfung auskommen. Für die Stärkenbemessung der Rohre werden die folgenden Angaben den Durchschnitt der für diese üblichen Betriebsspannungen zeigen:

3000 Volt = 1,5 mm,
4000 „ = 1,75—2 mm,
5000 „ = 2—2,5 mm,
7000 „ = 3 mm,
10000 „ = 4—4,5 mm.

Im Betriebe erfolgt der Durchschlag der Rohre in den allermeisten Fällen unmittelbar beim Eintritt des Rohres in den Eisenkörper oder auch bei den gelüfteten Maschinen an den Kanten der Luftschlitze. Durch Abrunden der scharfen Grate und Kanten an den äußeren Endblechen des Ständers kann man die ungünstige elektrische Feldentwicklung derart beeinflussen, daß das Zusammendrängen der Kraftlinien an diesen Stellen vermindert wird. Dieses Mittel versagt jedoch an den im Innern des Ständers liegenden Luftschlitzen. Nach einem jüngst erteilten D. R. P. ist man jedoch in der Lage, über der Axialfläche des Rohres ein homogenes elektrisches Feld dadurch zu erhalten, daß man eine Metallfolie um das Glimmerrohr legt und diese Metall-

Digitized by Google

folie durch eine dünne Hartpapierumlage schützt, die mit der Metallfolie verbundenen Kupferstreifen herausführt und diese sowohl unter sich, als auch mit dem Ständereisen verbindet.

Für die Herstellung von Kollektorringen gibt es gleichfalls zwei Methoden. Die ältere Art, die noch heute stark verbreitet ist, benutzt zur Anfertigung Mikanitstreifen geeigneter Längen und Breiten, welche in die Ringform zylindrisch eingelegt werden und zur Erzielung eines Innenkonus Einschnitte erhalten, welche gestatten, daß sich die entstehenden Zacken, entsprechend dem Innenkonus, überdecken. Derartige Ringe besitzen ein glattes Äußere, da die Glimmermaterialplatten ihrer Fläche nach zylindrisch oder konisch, in letztem Falle infolge der Einschnitte, verarbeitet sind. Diese Ringe haben nun den Nachteil, daß sie beim Einpressen aufreißen, wenn sie nicht sehr genau gearbeitet sind. Dieses ist bei Mikanit, wenn man den Maßstab der Metallbearbeitungspräzision anlegt, nur ganz ausnahmsweise möglich. Dieses Aufplatzen geschieht äußerlich unbemerkbar; erst die elektrische Prüfung weist an dem zusammengesetzten Kollektor auf den Fehler hin. Man verwendet daher lieber Ringe, die nach einer anderen, etwas kostspieligeren Art hergestellt sind, die aber eine wesentlich größere Sicherheit gegen das Aufplatzen gewährleistet. Man legt in radialer Anordnung schuppenförmig schmale Mikanitstreifen übereinander, deren Länge der gestreckten Höhe des Kollektorringes entspricht. Die Wandstärke des fertigen Ringes wird durch eine mehr oder minder größere Anzahl dieser schuppenförmigen, konzentrisch zulaufenden Lagen erzielt. Nach erfolgter Pressung zeigt die Oberfläche des Ringes innen wie außen parallel verlaufende Linien, welche an dem Innenkonus konzentrisch zueinander laufen. Diese Linien sind die Endbegrenzungen der vorher beschriebenen radial gelegten Streifen.

Die derart hergestellten Ringe weisen nun eine erheblich größere Elastizität auf, insbesondere können sie sich ein wenig dehnen und werden infolgedessen nur bei unverhältnismäßig großen Abweichungen aufplatzen. Hierzu kommt noch, daß die Genauigkeit der Wandstärke im Ringe selbst bei dieser Methode eine größere ist, als bei den Materialringen. Die Kollektoren, welche mit derartigen, sogenannten Streifenringen angefertigt sind, werden daher im Durchschnitt fester sein, als diejenigen, welche mit sogenannten Materialringen hergestellt sind.

Es sei zum Schlusse noch auf eine weit verbreitete Unachtsamkeit hingewiesen. Sehr viele Kollektorringe oder Manschetten werden mit zylindrischer Außenwand hergestellt. Es ist einleuchtend, wie diese zylindrische Form besonders hoher Ringe das Herausbringen aus der Form erschwert. Die Ringe haften, besonders wenn der Winkel nur

Digitized by Google

30° ist, sehr fest am Zylinder. Die Formen müssen stark geputzt werden, nutzen sich schnell ab und die Ringe werden bei zunehmender Wandstärke im Außenumfange größer; der Innenumfang aber wird kleiner.

Für den Kollektorbau sind mit Verwendung solcher Ringe oder zylindrischer Außenform eine Reihe von Nachteilen verbunden. Der Kollektor muß sehr genau gedreht sein, damit der Ring gut hineinpaßt; häufig muß nach dem Mikanitring gearbeitet werden. Paßt der Ring nur etwas zu stramm, so wird er dadurch verletzt, daß das Zylinderteil sich festklemmt, der Innenkonus aber noch nicht aufliegt. Beim Nachziehen wird der Ring einfach durchgepreßt.

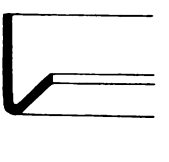


Abb. 8.

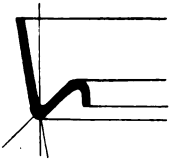


Abb. 9.

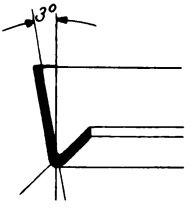


Abb. 10.

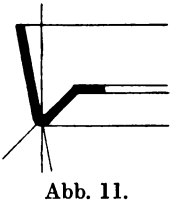


Abb. 11.

Sehr viel einfacher gestaltet es sich aber für den Hersteller und Verbraucher der Ringe, wenn er der Außenfläche als Kegelfläche von nur 2° besser noch 3° Neigung gibt, Abb. 8 bis 11. Es soll einzig und allein die Innenkonusfläche, die im Bilde mit 30° Neigung angenommen ist, die gesamte Pressung aufnehmen und die Zentrierung bewirken. Alle übrigen Mikanitteile sollen lediglich als Isolation dienen und mechanisch nicht beansprucht werden.

Die konischen Ringe werden an sich genauer in der Wandstärke. Indem man einige Zehntel Millimeter Luft gibt und am besten im Kupfer statt 3° einen Konus von $3^1/_2$—4° anwendet, erreicht man mit Sicherheit das vorbeschriebene Ziel.

Literaturverzeichnis.

Joh. Beckmann, Vorbereitung zur Warenkunde oder zur Kenntnis der vornehmsten ausländischen Waren. Göttingen 1796, Bd. 2, erstes Stück.

Hintze, Handbuch der Mineralogie. Bd. 2. Silikate und Titanate 1897. Memoirs of the geological survey of India. Bd. 34. Calcutta 1902.

Cirkel, Mica its occurrence, exploitation and uses. Ottawa Canada 1905.

Hugh S. de Schmidt, Mica its occurrence. Second Edition 1912, Ottawa.

Turner & Hobart, Die Isolierung elektr. Maschinen. Berlin 1906.

Tschermak, Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie 1878, S. 14 und 1879, S. 122.

Jahresbericht über die deutschen Schutzgebiete 1904—1910.

F. Wiggins in „Electrical Review“ 1912.

The Optical and Physical Properties of Mica. Silvanus Thompson.

The Optical and Photographic Trade Journal 1912, S. 101, London.

Digitized by Google

Albert Brun, Bull. de la Soc. Fr. de Minéralogie, Februar-März 1913, S. 44—45. Siehe auch gleiches Thema Arsendaux Bull. de la Soc. de Min. April 1913.

Dölter, Handbuch der Mineralchemie, 1914.

Niggli, Hydrothermale Synthese. Zeitschrift für Anorganische Chemie 83 mit ausführlicher Literatur 84 und 87.

Hans Zeitler, Der Glimmer. Verlag Jaroslaws. Erste Glimmerwarenfabrik in Berlin. 1913.

Dammer & Tietze, Die nutzbaren Mineralien. Bd. 2, S. 315. Stuttgart: Ferdinand Enke, 1914.

T. S. Taylor, Wärmeleitfähigkeit von Isolier- und anderen Stoffen. Electric Journal (Pittsburg). Dezember 1919, Bd. 16, Nr. 12, S. 526—532.

R. P. Jackson, Electric Insul. Material Electric Journal. August 1919.

Désiré Pector, Revue Générale de l'Electricité, 1919. De quelques matières premières nécessaires à l'Industrie électrique: la mica 673, 701, 735, 769 behandelt sämtliche z. Zt. bekannten Glimmervorkommen der Welt und gibt auch zahlreiche minderwichtige Literatur.

Digitized by Google

IV. Keramische Isolierstoffe.

Von W. Weicker.

A. Porzellan.

Zusammensetzung.

Unter den keramischen Isolierstoffen für Zwecke der Elektrotechnik nimmt unstreitig das Porzellan[1]) die wichtigste Stellung ein. Die Bestandteile des Porzellans sind Tonsubstanz, Feldspat und Quarz, deren Verhältnis in Prozenten ausgedrückt als rationelle Zusammensetzung bezeichnet wird. Nach der üblichen Einteilung der keramischen Erzeugnisse unterscheidet man bei Porzellan zwei Hauptgruppen, nämlich das Weichporzellan und das Hartporzellan, von dem jedoch nur das letztere für Isolierzwecke der Elektrotechnik in Betracht kommt.

Von den Bestandteilen jeder Porzellanmasse ist Kaolin und etwa zugesetzter Ton derjenige, der die Bildsamkeit der Masse bedingt, während Feldspat und Quarz als Magerungs- und Flußmittel dienen. Unter Kaolin sind dabei die als Verwitterungsprodukte der Eruptivgesteine entstandenen tonerdehaltigen Silikate (im folgenden als Tonsubstanz bezeichnet[2]), verstanden.

In der Natur kommt Kaolin nur selten rein vor, meist ist er mit Feldspat und Quarz vermischt. Der Schmelzpunkt reinen Kaolins, d. h. die Temperatur, bei der durch Erwärmung eine starke Formänderung stattfindet, liegt zwischen 1600 und 1800°. Als Fundorte von Kaolin kommen für die deutsche Porzellanindustrie hauptsächlich die Gegend von Halle, der Freistaat Sachsen (und zwar besonders die Umgegend von Meißen), Thüringen, Bayern, Böhmen, (Zettlitz und Karlsbad) und die Rheinprovinz in Betracht.

Der zweite Bestandteil, der Feldspat, ist der schmelzbare Bestandteil der Porzellanmasse, sein Schmelzpunkt liegt bei etwa 1200°.

Feldspat wurde vor dem Kriege hauptsächlich aus Norwegen bezogen, wo er in besonderer Reinheit vorkommt. Durch die Verhält-

[1]) Vgl. z. B. Kerl, B., Handbuch der gesamten Tonwarenindustrie. Braunschweig, Vieweg & Sohn 1907. — Rieke, Dr., Das Porzellan. Hannover, Jänecke 1910. — Dietz, Dr., Das Porzellan, seine Gewinnung, Verarbeitung und Verzierung. Halle, Wilhelm Knapp 1907. — Segers Gesammelte Schriften. Berlin 1908.

[2]) Tonsubstanz ist eine chemische Verbindung aus Tonerde (Al_2O_3), Kieselsäure (SiO_2) und Wasser (H_2O) von der Formel $Al_2O_3 \cdot 2\,SiO_2 \cdot 2\,H_2O$.

Digitized by Google

nisse gezwungen, hat die deutsche Porzellanindustrie während des Krieges gelernt, auch hierfür gleichwertigen Ersatz zu finden, so daß eine Verschlechterung der Porzellanmasse, infolge Umstellung der Rohstoffe, keinesfalls in Frage kommen kann.

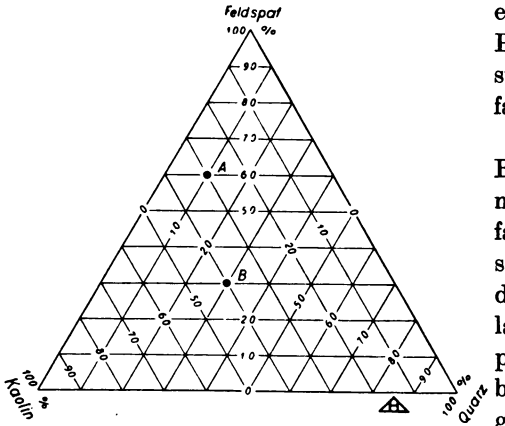


Abb. 1. Dreiachsige Koordinatendarstellung zur Kennzeichnung der Zusammensetzung einer keramischen Masse.

Der Quarz, der dritte Bestandteil der Porzellanmasse, oder der ihm an Güte fast gleichkommende Quarzsand, wird an den verschiedensten Stellen Deutschlands gefunden; sein Schmelzpunkt liegt etwa bei 1700 bis 1800°, so daß im allgemeinen beim Brande der Porzellanmasse (d. h. etwa 1350 bis 1450°), noch kein vollständiges Schmelzen erfolgt, sondern nur ein teilweises Lösen durch den geschmolzenen Feldspat.

Über die Bildungsweise und Natur des fertig gebrannten Porzellans bestehen, so alt dieses Erzeugnis auch ist, noch verschiedene Anschauungen.

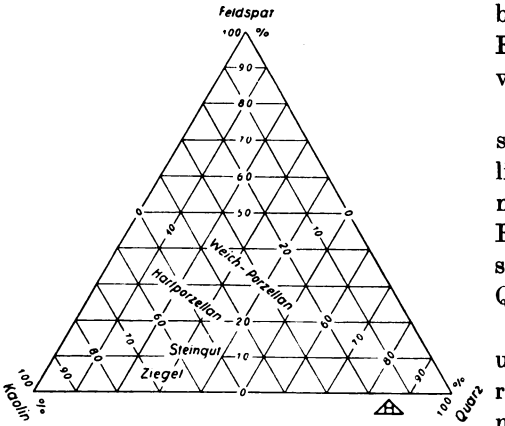


Abb. 2. Bereiche einiger keramischer Erzeugnisse nach ihrer Zusammensetzung.

Nach der früheren Anschauung ist Porzellan lediglich ein mechanisches Gemenge von geschmolzenem Feldspat, erhärteter Tonsubstanz und unverändertem Quarz.

Nach neuerer Anschauung[1]) findet dagegen während des Brandes eine chemische Reaktion statt, indem der geschmolzene Feldspat die Tonsubstanz und den Quarz teilweise auflöst. In diesem Schmelzfluß entstehen Kristalle (Sillimanit), die für die Güte des Porzellans ausschlaggebend sein sollen.

Was das Mengenverhältnis der drei Bestandteile des Porzellans

[1]) Zöllner, Dr., Zur Frage der chemischen und physikalischen Natur des Porzellans.

Digitized by Google

anbelangt, so ist dieses sehr verschieden; fast jede Porzellanfabrik hat in dieser Beziehung ihren eigenen Versatz. Immerhin kann als ungefährer Anhaltspunkt für Hartporzellan etwa folgende Zusammensetzung gelten: 50 Teile Tonsubstanz, 25 Teile Feldspat und 25 Teile Quarz. In welcher Weise sich je nach der Zusammensetzung der Masse der Charakter des keramischen Produktes ändert, kann am übersichtlichsten aus einer dreiachsigen Koordinatendarstellung, wie diese in der Keramik für die Zwecke der rationellen Analyse üblich ist, ersehen werden[1]). Abb. 1 zeigt eine derartige Darstellung, in der jeder Punkt durch drei Ordinaten bestimmt ist. Der eingezeichnete Punkt *A* beispielsweise würde enthalten 30% Kaolin, 60% Feldspat und 10% Quarz. Der Punkt *B* dagegen 40% Kaolin, 30% Feldspat und 30% Quarz.

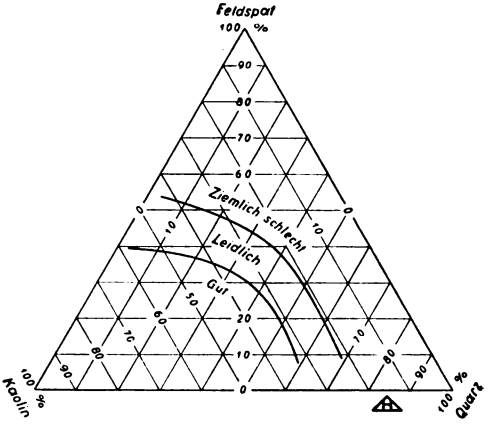


Abb. 3. Einfluß der Massezusammensetzung auf die Verarbeitungsfähigkeit.

In Abb. 2 sind die einzelnen Bereiche einiger keramischer Produkte gekennzeichnet, das Bild stellt also gewissermaßen eine Gebiets- oder Landkarte der Keramik dar.

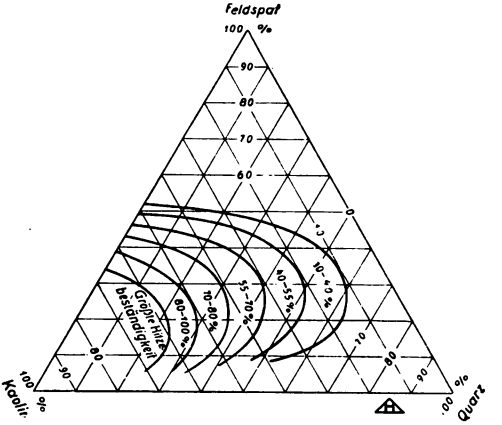


Abb. 4. Einfluß der Massezusammensetzung auf die Temperaturbeständigkeit.

Mit Hilfe dieser (Dreiecks-) Koordinatendarstellung ist es in sehr übersichtlicher Weise möglich, die Eigenschaften einer Porzellanmasse und den Einfluß einer Veränderung in der Zusammensetzung zu veranschaulichen[2]). Beispielsweise zeigt Abb. 3 die Beeinflussung in der Verarbeitungsfähigkeit. Man sieht ohne weiteres, wie mit zu-

[1]) Sprechsaal 1917, S. 2; Berichte der deutschen Keram. Gesellschaft, November 1920, S. 21.

[2]) Nach Gilchrest und Klinefelder, The Electric Journal, Februar u. März 1918.

Digitized by Google

nehmendem Kaolingehalt (Tonsubstanz) die Verarbeitungsfähigkeit im allgemeinen zunimmt.

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der Temperaturbeständigkeit. Diese hängt namentlich vom Kaolin- und Quarzgehalt ab, und zwar, wie zu erwarten, in dem Sinne, daß die Hitzebeständigkeit direkt mit dem Tongehalt, dagegen umgekehrt mit dem Quarzgehalt zunimmt. Der Feldspat ist dagegen von geringerem Einfluß.

Um nun zu sehen, wie das Optimum aller Eigenschaften mit einer bestimmten Massezusammensetzung erreicht werden kann, ist es nur nötig, die Beeinflussung der einzelnen untersuchten Eigenschaften in ein und demselben Bilde zu vereinigen. Dies ist in Abb. 5 geschehen, indem hier die Durchschlagsfestigkeit, die mechanische Festigkeit und die Temperaturbeständigkeit gemeinsam dargestellt sind. Die Abbildung zeigt jedoch auch, daß die Forderungen höchster Vollkommenheit sich widersprechen, es also nicht möglich ist, mit ein und derselben Massezusammensetzung gleichzeitig für jede Eigenschaft den höchsten Wert zu erreichen. Vielmehr muß, um allen Anforderungen gerecht zu werden, ein Ausgleich zwischen den sich teilweise widersprechenden Bedingungen geschlossen werden, was im vorliegenden Falle mit einer Zusammensetzung von etwa 40 bis 50% Kaolin, 25 bis 30% Feldspat und 25% Quarz erreicht werden würde.

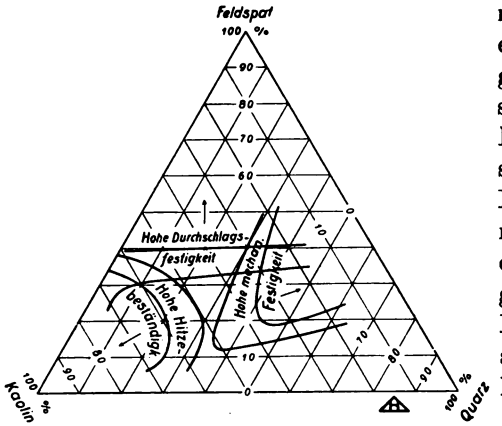


Abb. 5. Einfluß der Massezusammensetzung auf Durchschlagsfestigkeit, mechanische Festigkeit und Temperaturbeständigkeit.

Im übrigen sprechen, worauf ganz ausdrücklich hingewiesen werden muß, jedoch noch eine ganze Reihe anderer Umstände, so vor allem die Höhe der Brenntemperatur, die Brenndauer und die speziellen Eigenschaften der einzelnen Stoffe, vor allem des Tones, so stark mit, daß die hier gezeigten Kurven und die daraus gezogenen Schlußfolgerungen hierdurch überaus stark beeinflußt werden können.

Verarbeitung[1]).

Zunächst wird der Kaolin, der teils im Tagebau, teils unterirdisch gewonnen wird, von fremden Bestandteilen gereinigt, zu welchem

[1]) Vgl. z. B. Hegemann, Herstellung des Porzellans. Berlin 1904.

Digitized by Google

Zwecke der rohe Kaolin zunächst im Schlemmquirl aufgeweicht wird. Gröbere Bestandteile läßt man in Schlemmrinnen sich absetzen, worauf der nur noch feinste Tonsubstanzteilchen enthaltende Kaolinschlamm in Klärbehältern von dem überschüssigen Wasser befreit wird.

Die anderen Bestandteile der Porzellanmasse, Feldspat und Quarz, werden zunächst in Steinbrechern zu faustgroßen Stücken zerkleinert und dann in Kollergängen zu Pulverform zermahlen. Das Feinmahlen der so vorbearbeiteten Rohmaterialien erfolgt in Trommelmühlen. Zum Mahlen, das entweder trocken oder häufiger naß geschieht, wird die Trommel etwa zu gleichen Teilen mit dem zu zerkleinernden Mahlgut und Flintsteinen beschickt und dann während etwa 10 bis 30 Stunden in langsame Umdrehungen versetzt. Hierauf wird der Trommelversatz in einen Mischquirl abgelassen und dort mit der entsprechenden Menge Kaolinbrei gemischt. Zur Absonderung von Unreinheiten, insbesondere von Eisenteilchen, wird der Inhalt des Quirles über einen in eine Holzrinne eingebauten Elektromagneten hinweggeleitet und endlich durch ein Schüttelsieb von etwa 0,25 mm Maschenweite, das gröbere sonstige Verunreinigungen zurückhalten soll, in die sogenannten Schlickergruben abgelassen.

Um die Masse von überflüssigem Wasser zu befreien und sie zur endgültigen Verarbeitung vorzubereiten, wird sie endlich mittels Membranpumpen durch sogenannte Filterpressen hindurchgepreßt und dort entwässert.

Die hier gewonnenen Massekuchen, die immer noch etwa 20—25% Wasser enthalten, kommen hierauf zu längerer Lagerung in die Massekeller, in denen ein weiterer Zersetzungsprozeß, das „Faulen" der Masse, stattfindet, wodurch sie an Plastizität gewinnen soll.

Vor der Verarbeitung findet endlich, um die Masse völlig homogen und luftblasenfrei zu machen, noch eine erneute Durchknetung auf der Masseschlagmaschine statt.

Arbeitsverfahren.

Unter den Verarbeitungsverfahren der Porzellanmasse kann man fünf verschiedene Arten unterscheiden, nämlich das Drehen, Gießen, Ziehen, Quetschen und Pressen. Für elektrotechnische Zwecke ist bei weitem das wichtigste das Drehverfahren, nach welchem alle Rotationskörper, wie es die meisten Isolatoren sind, hergestellt werden, und das Preßverfahren (vielfach fälschlich Stanzverfahren genannt), das für kleine, beliebig gestaltete Isolierkörper, also für die Massenfabrikation, von größter Bedeutung geworden ist.

Grundsätzlich unterscheiden sich das Drehverfahren und das Preßverfahren sowohl durch die Art der Massezubereitung, wie auch durch die Verarbeitung selbst. Bei dem Drehverfahren wird die Masse in

Digitized by Google

demselben Zustand, wie sie von der Masseschlagmaschine kommt, also nur mit ihrem ursprünglichen Wassergehalt, in knetbarer, plastischer Form auf der Drehscheibe verarbeitet; bei dem Preßverfahren dagegen wird die zuvor getrocknete und pulverisierte Masse mit Öl, Petroleum und Wasser gemischt und in besonderen Stahlformen in die gewünschte Form gebracht.

Es sei hier kurz noch einiger anderer keramischer Isoliermittel, wie der specksteinhaltigen Materialien, die unter dem Namen Melalith, Steatit und ähnlichen Bezeichnungen bekannt sind, gedacht. Diese Isolierstoffe bestehen größtenteils aus Speckstein und dienen hauptsächlich zum Pressen von kleineren Isoliergegenständen, in gleicher Weise wie Porzellan. Von dem Porzellan unterscheiden sich diese Stoffe hauptsächlich dadurch, daß sie geringere Schwindung als Porzellan besitzen und weniger spröde sind. Außerdem ist der Scherben dieser Massen nicht so reinweiß wie bei Porzellan.

Zur Kennzeichnung der verschiedenen Arbeitsverfahren, vor allem des für elektrotechnische Zwecke wichtigsten, des Drehverfahrens, sei die Herstellungsweise der bekannten Reichsmodellglocke kurz beschrieben:

Zunächst wird auf Grund der Zeichnung ein Modell des Isolators aus Gips, oder bei besonders viel gebrauchten Formen auch aus Metall hergestellt. Dieses Modell ist ein äußerlich genaues Abbild des fertigen Isolators, jedoch in seinen Abmessungen um etwa 15 bis 20% größer, entsprechend der Schwindung, die der Isolator im Brande erfährt. Von diesem Modell werden nun Abgüsse, die sogenannten „Formen", wieder aus Gips hergestellt. In diese Formen wird die in Gestalt sogenannter Hubel schon vorgearbeitete Porzellanmasse mit dem Stempel eines Preßbocks kräftig hineingepreßt. Der Isolator hat hierdurch seine äußere Gestalt erhalten. Die inneren Umrisse werden, während der noch in der Form befindliche Isolator auf der Drehscheibe umläuft, mit einer eisernen Schablone, die an einem drehbaren Schablonenhalter befestigt ist, ausgedreht.

Die nächste Arbeit ist das Schneiden des Gewindes für das Stützenloch, das entweder mittels Vollbohrers, oder, was das Häufigere ist, mittels Viertelbohrers geschieht.

In ganz ähnlicher Weise, wie eben beschrieben, wird auch die innere Hülse des Isolators hergestellt. Diese wird nun mit Schlicker, d. h. dickflüssiger Porzellanmasse, an den Isolator, an dem zu diesem Zwecke eine besondere Ansatzfläche vorgesehen war, angesetzt, oder, wie der Fachausdruck lautet, „angarniert", wodurch eine völlig innige Vereinigung der beiden Teile erreicht wird.

Es fehlt dem Isolator nun noch die Halsrille, die mittels Schablone eingeschnitten wird, nachdem der Isolator aus der Gipsform entfernt und auf einen Dorn aufgesteckt ist.

Digitized by Google

Vor dem Brande müssen die Isolatoren zunächst völlig lufttrocken werden, was bei großen Stücken oft mehrere Wochen bis Monate dauert.

Das eben für die Herstellung von Niederspannungsisolatoren beschriebene Verfahren wird im allgemeinen auch für Hochspannungsisolatoren angewendet, indem bei mehrteiligen Isolatoren jeder Teil für sich in ganz entsprechender Weise behandelt wird. Auch Stützer und Durchführungsisolatoren werden in ganz ähnlicher Weise hergestellt. Bei ihnen kann man neben dem soeben beschriebenen Verfahren des Einformens in Gipsformen noch eine weitere Herstellungsart anwenden, nämlich das „Freidrehen". Hierbei wird über einen mit der Drehscheibe fest verbundenen Dorn, der eine der späteren Bohrung des Isolators entsprechende Stärke besitzt, mit den Händen allmählich soviel Masse aufgearbeitet, bis diese eine dem Isolator entsprechende Dicke und Form erreicht. Hierauf wird der Isolator von dem Dorn abgezogen und dann längere Zeit an der Luft getrocknet, bis er lederhart geworden ist. Erst dann werden dem Isolator auf einer Horizontaldrehbank mittels eiserner Schablone die äußeren Umrisse gegeben.

Längere glatte Rohre werden dagegen meist „gezogen". Diese Herstellungsweise besteht darin, daß die Porzellanmasse in einen eisernen Zylinder gefüllt wird, aus dem sie mit Hilfe eines Kolbens durch eine dem Querschnitt des Rohres entsprechende Öffnung herausgepresst wird.

Eine verhältnismäßig untergeordnete Bedeutung bei der Herstellung elektrotechnischer Gegenstände hat das Quetsch- und Gießverfahren, welch letzteres bei der Geschirrfabrikation eine desto größere Rolle spielt. Für elektrotechnische Zwecke kommt es hauptsächlich für die Herstellung solcher Körper, wie gebogene Hülsen, usw. in Betracht, die nicht Rotationskörper sind, also nicht gedreht werden können.

Ungleich wichtiger für Zwecke der Isoliertechnik ist das Preßverfahren. Nach diesem werden all die überaus zahlreichen Isoliergegenstände für Inneninstallation, z. B. für Schalter, Sicherungselemente, Steckdosen, Fassungen usw., sowie ganze Klemmen, Tüllen, Rollen, Einführungspfeifen usw. hergestellt. Das Hauptkennzeichen des Preßverfahrens ist die Verwendung von Stahlformen oder Matrizen an Stelle der bisher besprochenen Gipsformen und die andere Zübereitung der „trockenen" Masse. Stahl ist für diese Zwecke einmal bedingt durch den großen Druck, der auf den Preßling ausgeübt werden muß und sodann durch die äußerst komplizierte Gestalt, welche eine solche Matrize oft besitzt.

Auf die Ausführung der Matrizen im einzelnen einzugehen würde viel zu weit führen. Die weitaus häufigste Form der Matrizen setzt sich aus Ober- und Unterstempel zusammen, wobei durch den so-

Digitized by Google

genannten „Abdrücker" dafür gesorgt werden muß, daß sich nach erfolgtem Auspressen nicht alle Metallteile des Stempels gleichzeitig von der Porzellanmasse lösen. Vielmehr muß zunächst Luft zwischen die sich zunächst abhebenden Teile des Oberstempels und den dadurch teilweise freigewordenen Preßling eintreten können, um ein Zerreißen desselben zu vermeiden. Um das Herausnehmen des Preßlings aus dem Unterstempel zu erleichtern, werden auch bei diesem einzelne Teile für sich beweglich angeordnet, die mit dem „Ausheber" verbunden sind. Abdrücker und Ausheber sind also zwei unentbehrliche Bestandteile fast jeder Matrize. Hierzu kommt nun je nach Art des betreffenden Stückes unter Umständen eine Fülle von Schiebern, Stiften und dergleichen, mit deren Hilfe die verschiedensten Einschnitte, Versenkungen, Aussparungen, Gewindegänge usw. hergestellt werden, die aus naheliegenden Gründen nicht fest in der Matrize angebracht werden können. Jedenfalls ist mittels Stahlmatrizen die Herstellung selbst der verwickeltsten Formen möglich, und die zugehörigen Matrizen stellen in dieser Beziehung oftmals wahre Kunstwerke dar. Freilich kann bei dem hohen Preis derartiger Matrizen dieses Verfahren nur dann in Betracht kommen, wenn eine entsprechend große Anzahl gleichartiger Porzellanstücke in Frage kommt.

Nach dem Pressen werden die Stücke in gleicher Weise wie die nach dem Drehverfahren hergestellten getrocknet, worauf sie nachgeputzt werden, um vor allem die vorstehenden Nähte zu entfernen.

Sind die Isolatoren vollkommen lufttrocken geworden, was unter Umständen in besonders geheizten Trockenkammern geschieht, so werden sie bei einer Temperatur von etwa 800 bis 900° verglüht. Dieses Verglühen dient hauptsächlich dem Zwecke, der zunächst noch sehr leicht zerbrechlichen Ware eine größere Festigkeit und zugleich hohe Porosität zu geben, was für das Glasieren wünschenswert ist.

Zu diesem Zwecke werden die Isolatoren in der Regel in die Glasurflüssigkeit eingetaucht. Das Wasser wird hierbei begierig von dem porösen Scherben aufgesaugt und die Glasurmasse bleibt als dünner Überzug auf der Porzellanoberfläche zurück.

Die Glasur besteht meist aus einer Mischung von Porzellanmasse, Quarz und Flußmitteln, deren Schmelztemperatur so gewählt ist, daß die Glasur bei der Garbrandtemperatur des Porzellans zwar eben flüssig wird, aber noch nicht abläuft.

Diejenigen Stellen, auf denen das Porzellan im Brande aufruht, müssen dabei stets unglasiert bleiben.

Die Farbe der Glasur ist meist weiß, doch werden mit Vorliebe namentlich für Hochspannungsisolatoren auch farbige, besonders grüne und braune Glasuren bevorzugt.

Digitized by Google

Brennen.

Zum Brennen werden die Isolatoren, um sie gegen die unmittelbare Einwirkung der Flamme zu schützen, in feuerfeste Chamottekapseln gefüllt, die, zu Stößen aufeinander geschichtet, im Ofen nebeneinander gereiht werden.

Der Brennprozeß selbst zerfällt meist in zwei Abschnitte, den eben schon erwähnten Glühbrand mit einer Temperatur von 800 bis 900° und den Glattbrand mit einer Temperatur von etwa 1350 bis 1450°. Der richtige Gang des Brennprozesses ist für den Ausfall der gebrannten Porzellanware von größter Bedeutung. Der Temperaturverlauf wird daher auf das sorgfältigste überwacht und geregelt, da sowohl ein zu schneller Anstieg der Temperatur, wie auch ein zu rasches Abkühlen schädlich ist und das Entstehen von Brandrissen begünstigt.

Zur Messung der Ofentemperatur dienen sogenannte Segerkegel[1]). Es sind dies tetraedrische, etwa 5 cm hohe Körper, die aus verschiedenen keramischen Massen in verschiedenem Mischungsverhältnis hergestellt werden und je nach ihrer Zusammensetzung bei verschiedener Temperatur (je etwa 20 bis 30° Unterschied) zu erweichen und umzusinken beginnen. Allerdings wird das Fallen, d. h. das Berühren des Bodens der Unterlage durch den umgebogenen Kegel recht erheblich von der Dauer der Temperatureinwirkung beeinflußt.

Zu genaueren Temperaturmessungen bedient man sich daher besser registrierender Pyrometer, mit deren Hilfe der Temperaturverlauf am sichersten verfolgt werden kann.

Die Dauer eines Brandes richtet sich bei den zur Zeit noch meist gebräuchlichen zweistöckigen Rundöfen, unter denen man solche mit direkter und solche mit überschlagender Flamme unterscheidet, nach der Größe des Ofens und beträgt etwa 26 bis 30 Stunden. Ist der Ofen genügend ausgekühlt, was weitere 30 bis 40 Stunden beansprucht, so werden die Kapseln ausgetragen, worauf der Ofen zu erneuter Beschickung bereit ist.

Ein grundsätzlicher Nachteil all dieser Rundöfen besteht in dem aussetzenden (periodischen) Betrieb, der durch das Füllen und Entleeren bedingt ist.

Die hierbei entstehenden Wärmeverluste werden in den neueren Tunnelöfen vermieden, bei denen nur ein verhältnismäßig kleiner Teil des entweder gerade oder ringförmig angeordneten Tunnels ständig geheizt wird, während die Kapselstöße auf fahrbaren feuerfesten Wagen langsam durch die Feuerzone bewegt werden.

Dadurch, daß die Feuerzone dauernd auf gleichmäßig hoher Temperatur gehalten und die von dem Brenngut aufgenommene Wärme fast vollkommen wieder verwertet werden kann, gestatten derartige Öfen eine beträchtliche Brennstoffersparnis, zumal sie bei Generator-Gasheizung auch die Verwendung von Rohbraunkohle ermöglichen.

[1]) Segers Gesammelte Schriften S. 847.

Digitized by Google

Eine Mittelstufe zwischen Rund- und Tunnelofen bilden die sogenannten Gaskammeröfen[1]). Bei diesen ist ein System von mehreren Ofenkammern, die zu einem Ring zusammengeschlossen sind, hintereinander geschaltet. Die Feuerung ist, wie bei dem Tunnelofen, dauernd und wird den einzelnen Kammern nacheinander zugeführt, die schon durch die Verbrennungsgase des zuvor glatt gebrannten Ofens vorgewärmt waren.

In dem Glattofen erfährt das Porzellan die ihm eigentümliche große Schwindung, die bis 20% beträgt. Naturgemäß erschwert die Schwindung die genaue Einhaltung der Maße, zumal die Schwindung je nach Gestalt und Stärke des Brennkörpers verschieden ist.

Maßabweichungen von $\pm$ 5% müssen daher im allgemeinen stets vorbehalten bleiben.

Eigenschaften des Porzellans[2]).

1. Elektrische Eigenschaften. a) Isolationswiderstand (Durchgangswiderstand): Dieser ist bei gutem Porzellan so hoch, daß er stets gegenüber dem Oberflächenwiderstand vernachlässigt werden kann. Wenn auch wirklich zuverlässige Messungen hierüber schwer durchzuführen sind, dürfte der spezifische Widerstand mehr als 10^{14} bis 10^{15} Ohmcm bei gewöhnlicher Temperatur betragen[3]).

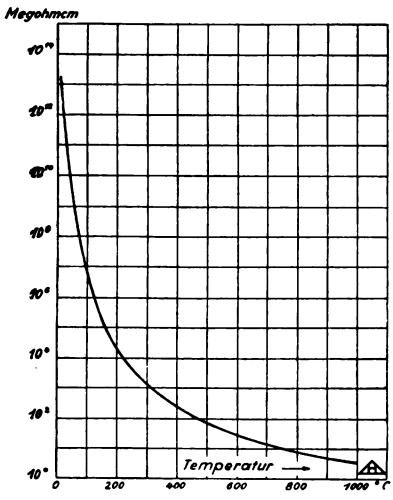


Abb. 6. Spezifischer Widerstand von Porzellan in Abhängigkeit von der Temperatur.

Allerdings ist der Widerstand wie bei allen Silikaten, die in glühendem Zustande leitend werden, eine Funktion der Temperatur; vgl. Abb. 6.

b) Oberflächenwiderstand: Der Oberflächenwiderstand ist neben der Oberflächenbeschaffenheit lediglich von der Feuchtigkeit der umgebenden Luft abhängig. Die Größenordnung des Oberflächenwiderstandes eines Isolators bei verschiedener Luftfeuchtigkeit mögen nachstehende Angaben für ein Reichspostmodell Nr. 1 veranschaulichen:

[1]) Scheid, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1923, S. 268.

[2]) Singer, Dr., Die Keramik im Dienste von Industrie und Volkswirtschaft, S. 472 bis 474; VDI. 1923, S. 584; Rieke, Zeitschr. f. angew. Chemie, 1915, S. 321; Singer-Rosenthal, Ber. d. deutschen keram. Ges. 1920, 3. Heft, S. 47.

[3]) Curtis, Scientific papers of the Bureau of Standards, Nr. 234 vom 8. Juni 1914, S. 419; Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik 1923, S. 785; Landolt-Börnstein 1905, S. 724.

Digitized by Google

Bei	40%	Luftfeuchtigkeit	etwa	2 000 000 Megohm,
„	60%	„	„	65 000 „
„	80%	„	„	2 000 „
„	100%	„	„	100 „

In Abb. 7 sind diese Werte, sowie deren Logarithmen aufgetragen, welch letztere innerhalb gewisser Grenzen annähernd eine gerade Linie ergeben.

Der Unterschied reiner und verschmutzter Isolatoren besteht hauptsächlich darin, daß nach Beregnung die ursprünglichen Isolationswiderstände um so rascher wieder erreicht werden, je reiner die Glocken sind[1]). Von der Größe des Isolators ist dagegen die Höhe seines Oberflächenwiderstandes nur wenig abhängig, da mit zunehmender Größe im allgemeinen nicht nur die Länge des Isolationswegs, sondern auch dessen Breite zunimmt. Eine Vergrößerung des Isolatordurchmessers hat daher auf den gesamten Oberflächenwiderstand einen viel geringeren Einfluß als eine Vergrößerung der Höhe.

Auch der Einfluß der Glasur ist durchaus nicht so groß, wie gemeinhin angenommen wird. Vergleichsweise einer längeren Reihe von Jahren dem Rauche der Porzellanöfen ausgesetzte Isolatoren ließen kaum einen Unterschied in bezug auf Oberflächenwiderstand zwischen glasiertem und unglasiertem Porzellan erkennen.

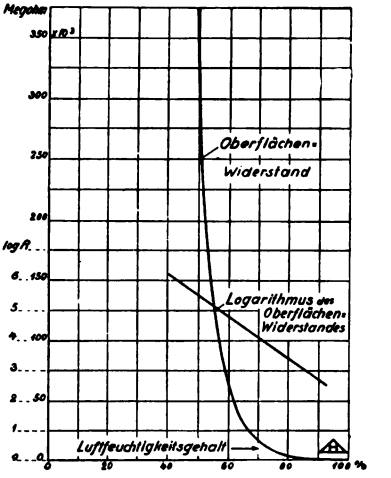


Abb. 7. Abhängigkeit des Oberflächenwiderstandes eines Isolators von der Luftfeuchtigkeit.

c) Durchschlagsfestigkeit: Diese hängt, wie bekannt, außerordentlich von der Form der Elektroden und der Ausbildung des elektrischen Feldes an der Durchschlagsstelle ab. Da bei der verhältnismäßig hohen spezifischen Durchschlagsfestigkeit gut gebrannten Porzellans zur Vermeidung von Randentladungen im allgemeinen das Eintauchen der Probekörper in Öl notwendig ist, so wird bei dem verschiedenen Wert der Dielektrizitätskonstante von Porzellan und Öl hierdurch eine weitere Unsicherheit bei der Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit des Porzellans bedingt.

Hierzu kommt ferner der Einfluß der Wandstärke, der insofern bei Porzellan von besonderer Bedeutung ist, als schwache Scherben-

[1]) ETZ. 1893, S. 503.

Digitized by Google

stärken naturgemäß gleichmäßiger durchgebrannt werden können, als größere Wandstärken.

Weiter spielt noch die Größe des untersuchten Probestückes eine gewisse Rolle, da bei größeren Stücken die Wahrscheinlichkeit eines immerhin möglichen Materialfehlers zunimmt und damit der mittlere Durchschlagswert naturgemäß herabgesetzt wird.

Ferner beeinflußt noch die Zusammensetzung der Masse und vor allem die Höhe der Brenntemperatur die Durchschlagsfestigkeit des Porzellans in erheblichem Maße. Hierzu kommen endlich noch die bei allen derartigen Durchschlagsversuchen wichtigen Versuchsbedingungen, wie Dauer der Beanspruchung, Art der Spannungsregelung, die Spannungskurvenform usw.

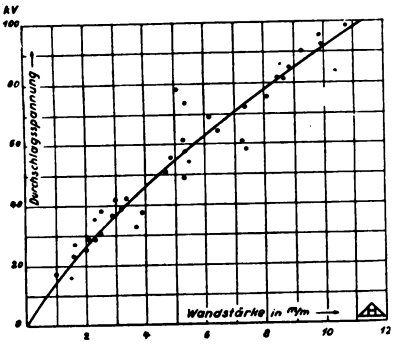


Abb. 8. Durchschlagsfestigkeit von Porzellanplatten zwischen einer Kugelelektrode und Quecksilberspiegel.

In Anbetracht all' dieser Gesichtspunkte ist es verständlich, daß es ganz unmöglich ist, für Hartporzellan allgemein gültige eindeutige Angaben der Durchschlagsfestigkeit zu erhalten. Die in der Literatur bisher veröffentlichen Werte beziehen sich alle auf eine ganz bestimmte Versuchsanordnung und gelten dann eben nur für diese.

Am verbreitetsten ist wohl eine von Professor Friese vor etwa 20 Jahren in einem Buche: „Das Porzellan als Isolier- und Konstruktionsmaterial in der Elektrotechnik" veröffentlichte Kurve, die für Hermsdorfer Porzellan gilt und an Porzellanzylindern zwischen Kugelelektroden und Quecksilber-Spiegel aufgenommen ist (Abb. 8).

Eine zu Vergleichsversuchen verschiedener Porzellanmassen viel gebrauchte Anordnung zwischen Spitzenelektroden unter Öl muß wegen des völlig unbestimmten elektrischen Feldes, das keinerlei rechnerische Auswertung zuläßt, ausscheiden.

Zuverlässiger in dieser Beziehung ist ein von der Porzellanfabrik Hermsdorf angewandtes Meßverfahren, bei dem die Durchschlagsplatten mit halbkugelförmigen Vertiefungen und beiderseitig mit einem leitenden Überzug als Elektroden versehen werden. Hierdurch entfallen die bekannten Schwierigkeiten, die sich infolge der unsicheren Berührung zwischen Elektrode und Isoliermaterial bei der Prüfung unter Öl in der Regel ergeben.

Abb. 9 veranschaulicht die auf diese Weise ermittelte Durchschlagsfestigkeit in Abhängigkeit von der Wandstärke.

Digitized by Google

Wichtiger als die Untersuchung einzelner Probeplatten ist die Bestimmung der Durchschlagsfestigkeit fertiger Isolatoren. Eine unter Zugrundelegung der jeweils kleinsten Wandstärke an einer Reihe verschieden großer Deltaisolatoren der Porzellanfabrik Hermsdorf aufgenommene Durchschlagskurve zeigt Abb. 10. Die Isolatoren wurden dabei unter Öl durchgeschlagen, indem das Stützenloch leitend gemacht, und außen um die Halsrille des Isolators ein unmittelbar anliegender leitender Überzug gelegt wurde.

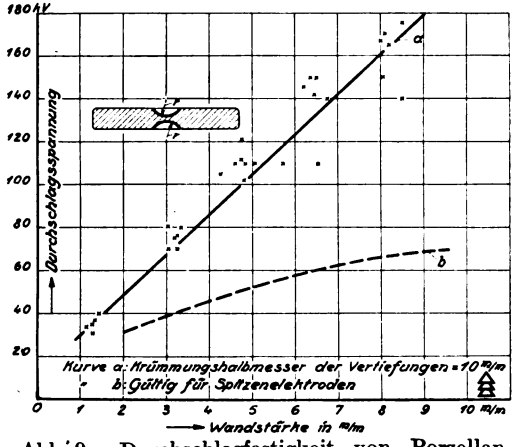


Abb. 9. Durchschlagfestigkeit von Porzellanplatten mit halbkugelförmigen Vertiefungen.

Die Glasur ist praktisch ohne jeden Einfluß auf die Durchschlagsfestigkeit des Isolators, was bei ihrer geringen Stärke (etwa $^1/_4$ mm) gegenüber der weit größeren Porzellanwandstärke von vornherein zu erwarten ist. Etwas anders mag dies bei minderwertigen keramischen Massen sein, die jedoch dann überhaupt nicht in der Elektrotechnik Verwendung finden sollten.

d) Dielektrizitätskonstante: In der Literatur ist im allgemeinen bisher ein Wert von 4 bis 5 angegeben, der sich auf ältere Messungen von Professor Wirtz, Darmstadt[1]) gründet. Nach neueren Messungen ist die Dielektrizitätskonstante handelsüblicher Isolatoren jedoch etwas höher, und liegt etwa zwischen 5,5 und 6.

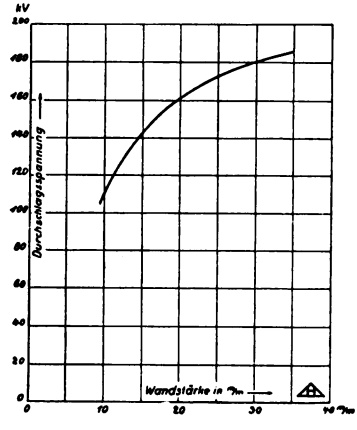


Abb. 10. Durchschlagfestigkeit von Isolatoren in Abhängigkeit von der kleinsten Wandstärke an der Durchschlagstelle.

e) Dielektrische Verluste: Diese sind bei gutem Porzellan außerordentlich gering; der Verlustwinkel beträgt ungefähr 1°.

Jedenfalls sind die dielektrischen Verluste bei Porzellan praktisch vollkommen zu vernachlässigen.

---

[1]) Friese, Das Porzellan als Isolier- und Konstruktionsmaterial in der Elektrotechnik 1904, S. 46.

Digitized by Google

Bei dieser Gelegenheit mag noch die oft aufgeworfene Frage nach den an Freileitungsisolatoren auftretenden Verlusten berührt werden. Nach dem eben Gesagten können sie nur auf Oberflächenleitung zurückzuführen sein. Diese hängt jedoch ausschließlich von der Feuchtigkeit der Luft, bei Freileitungsisolatoren außerdem von etwaiger Benetzung durch Regen, feuchten Schnee, Nebel usw. ab. Wenn auch unter besonders ungünstigen klimatischen Verhältnissen der Widerstand eines Freileitungsisolators bis auf etwa 10 Megohm sinken kann, was beispielsweise bei 6500 Volt Phasenspannung gegen Erde (entsprechend 10 000 Volt Netzspannung) einen Verlust von 3 bis

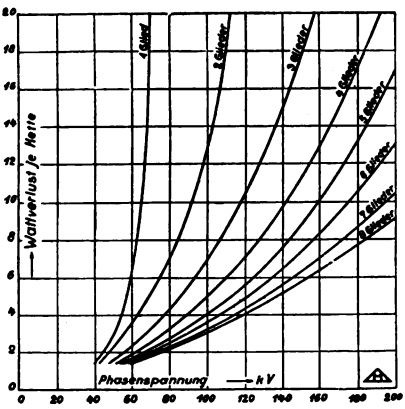


Abb. 11. Verlustkurven für Hängeisolatorenketten verschiedener Gliedzahl in trockener Luft.

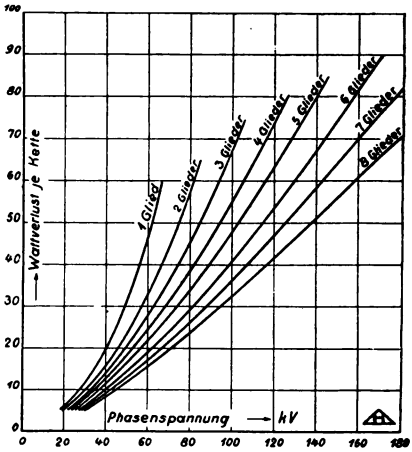


Abb. 12. Verlustkurven für Hängeisolatorenketten verschiedener Gliedzahl in Wasserdampf gesättigter Luft.

4 Watt je Isolator bedeuten würde (nur an Seeküsten sind Werte bis herab zu 1 Megohm gemessen worden), so wird dieser verhältnismäßig niedrige Isolationswert bei einem unter Spannung stehenden Isolator praktisch nie oder nur im Augenblick des Einschaltens der Leitung erreicht. Denn unter der Einwirkung des elektrischen Feldes und infolge der entwickelten Jouleschen Wärme erfährt der Isolator eine fast sofortige starke Widerstandszunahme. Die Verluste sinken dabei auf einen Bruchteil der ursprünglichen Werte. Genauere Versuche zeigen, daß der Widerstand unmittelbar von der Höhe der angelegten Spannung abhängt[1]).

Nachstehend noch einige Zahlen für die praktisch auftretenden Isolatorenverluste, gemessen bei 6500 Volt Phasenspannung gegen Erde (also 10 000 Volt Netzspannung) an einem Isolator der genormten Größe *H* 6:

[1]) W. Weicker, ETZ. 1910, S. 888.

Digitized by Google

In trockener Luft	0,05 Watt,
bei schwachem Nebel	0,15 „
Nebel bei Schneefall unter 0°	0,25 „
Landregen bei hoher Luftfeuchtigkeit	1,1 „
bei heftigem Gewitterregen mit Sturm	1,5 „
bei starkem Regen, vermischt mit Schnee über 0°	2,2 „

Macht man für die während eines Jahres herrschende Witterung auf Grund meteorologischer Unterlagen bestimmte Annahmen, so erhält man beispielsweise für eine 10 km lange Fernleitung mit 600 Isolatoren (Holzmasten von 50 m Abstand vorausgesetzt) einen Jahresverlust von 2300 kW-Stunden. Nimmt man weiter an, daß auf eben dieser Leitung bei der angenommenen Betriebsspannung von 10 000 Volt durchschnittlich 360 kW, also im Jahre etwa 3 000 000 kW-Stunden übertragen würden, so machen die Isolatorenverluste nur etwa 0,07% aus!

Für Hängeisolatoren verschiedener Gliedzahl geben die Abb. 11 u. 12 die Größenordnung der möglichen Verluste in trockenem und stark benetztem Zustand.

2. Mechanische Eigenschaften[1]). a) Härte. Nach der Mohsschen 10teiligen Härteskala, die entsprechend der Härtebezeichnung von 1 bis 10 (Diamant)Relativwerte angibt, beträgt die Härte unglasierten, gargebrannten Hartporzellans 7, die der Glasur 8. Bei der letzteren ist namentlich die Oberflächenschicht gegen äußere Angriffe besonders widerstandsfähig.

b) Mechanische Festigkeit. Die mechanische Festigkeit (sowohl Zug- wie Druckfestigkeit) hängt außerordentlich von der Größe des beanspruchten Querschnittes und der Art der Beanspruchung ab. Bei kleinen Querschnitten und völlig planparallelen Druckflächen können überraschend hohe Festigkeitswerte erzielt werden. So wurden bei Druckkörpern von 50 mm Durchmesser Werte von 4000 bis 5000 kg/cm² Druckfestigkeit erhalten. Die praktisch erreichbaren Werte liegen dagegen bedeutend niedriger, und erreichen je nach dem Durchmesser des zylindrischen Probestückes Werte von 1000 bis 4000 kg/cm, wobei die größte Festigkeit für den kleinsten Querschnitt gilt (vgl. Abb. 13).

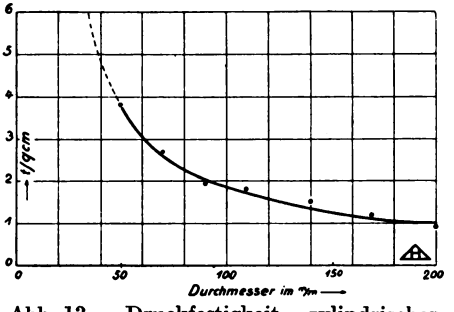


Abb. 13. Druckfestigkeit zylindrischer Körper in Abhängigkeit vom Durchmesser.

[1]) Demuth, Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik, 1923, S. 150; ETZ. 1920, S. 891; Rosenthal-Singer, ETZ. 1920, S. 705; Über die Zähigkeit keramischer Massen. Bücher d. Deutsch. Ker. Ges. 1921; Rieke-Gary, Berichte d. Deutsch. Ker. Ges. Bd. 3, Heft 1, S. 5.

Digitized by Google

Praktisch wichtiger sind die an betriebsmäßig montierten Abspannkugeln oder Abspann-Schlingenisolatoren erreichbaren Festigkeitswerte. Für diese werden in der für Hochspannungsleitungen üblichen Größe im Durchschnitt etwa Festigkeitswerte von 4 bis 5000 kg erhalten, während Spezialisolatoren (z. B. Sattelisolatoren), wie sie in den Pardunen zum Abspannen von Antennenmasten häufig Verwendung finden, eine Bruchfestigkeit von 10000 bis 15000 kg, größere auch von 20000 kg besitzen [1]).

Mit der Zugfestigkeit steht es ähnlich wie mit der Druckfestigkeit, auch hier können bei besonders zubereiteten Stücken erstaunlich hohe Werte erreicht werden; die an Betriebsisolatoren, z. B. Abspann-Knüppelisolatoren gemessenen Werte liegen jedoch wegen der nicht ganz auszuschließenden Biegungsbeanspruchung wesentlich tiefer und lassen nur mit einer mittleren Zugfestigkeit von höchstens 200 bis 250 kg/qcm rechnen.

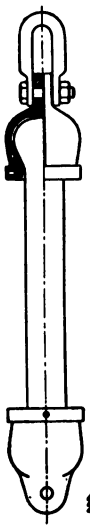


Abb. 14. Auf Zug beanspruchter Knüppelisolator.

Im übrigen muß jedoch gegen die vorherrschende Meinung, es dürfte Porzellan überhaupt nicht auf Zug beansprucht werden, entschieden Stellung genommen werden. Sofern man mit der spezifischen Beanspruchung unter der zulässigen Grenze bleibt und vor allem durch geeignete Lagerung der Endarmaturen zusätzliche Biegungsbeanspruchungen vermeidet, bieten Porzellanzugisolatoren, wie dies der große Erfolg der rein auf Zug beanspruchten, für Zwecke der drahtlosen Telegraphie viel verwendeten sogenannten Knüppelisolatoren (Abb. 14) beweist, unbedingte Sicherheit.

Auch für Hochspannungs-Kraftübertragungszwecke können Zugisolatoren unbedenklich Verwendung finden. Die Befürchtung, daß hier durch Steinwürfe oder sonstige äußere Beschädigungen ein Bruch des Isolators eintreten könne, ist kaum stichhaltig. Als Beweis diene Abb. 15, die eine mit 500 kg belastete Kette darstellt, deren Einzelglieder mit einem Pendelhammer so lange bearbeitet wurden, bis sämtliche Porzellanmäntel abgeschlagen waren. Der eigentliche Zugteil selbst blieb jedoch dabei völlig unversehrt.

Die Biegefestigkeit von Porzellan liegt nach bisherigen Literaturangaben [2]) bei etwa 400 bis 650 kg/cm². Diese Werte sind stark von Form und Querschnitt des Versuchskörpers abhängig.

Erwähnt sei noch die Schlagbiegeprüfung [3]), die zur vergleichs-

[1]) Demuth, Die Isolatoren für drahtlose Telegraphie. Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie. 1922. Heft 4, S. 278.

[2]) Friese, Das Porzellan usw., S. 41; Rosenthal-Singer, ETZ. 1920, S. 706; Singer, Dr., Der elektrische Betrieb, 1923, S. 191.

[3]) Rosenthal-Singer, Keramische Rundschau, 1921, S. 81.

Digitized by Google

weisen Beurteilung verschiedener Porzellanmassen neuerdings viel empfohlen wird.

c) Bearbeitbarkeit. Diese ist äußerst beschränkt. Fast die einzige Möglichkeit, dem fertiggebrannten Stück beizukommen, beruht auf dem Nachschleifen und Schneiden mit Spezialmaschinen, Mittel, die naturgemäß nur in Ausnahmefällen in Betracht kommen können.

d) Ausdehnung. Der lineare Ausdehnungskoeffizient gargebrannten Porzellans ist je nach der Massezusammensetzung und Brenntemperatur ziemlich verschieden und liegt etwa zwischen 4 bis $6 \cdot 10^{-6}$.

e) Hygroskopie oder Porosität. Man unterscheidet hierbei zwischen der wahren und scheinbaren Porosität. Unter der letzteren versteht man den Raum der nach außen offenen Poren, der durch eine Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens, bezogen auf das Gewicht des trockenen Körpers, erhalten wird.

Die wahre Porosität, d. h. der von den offenen und geschlossenen Poren eingenommene Porenraum, kann dagegen nur durch Pulverisierung des Probekörpers und Bestimmung des wirklichen spezifischen Gewichts (also ohne Poren) ermittelt werden.

Die scheinbare Porosität ist bei gut gebranntem Porzellan gleich Null, nur bei gepreßtem Porzellan kann bei genügend langer Wasserlagerung eine geringe Gewichtszunahme (von Bruchteilen eines Prozentes) festgestellt werden.

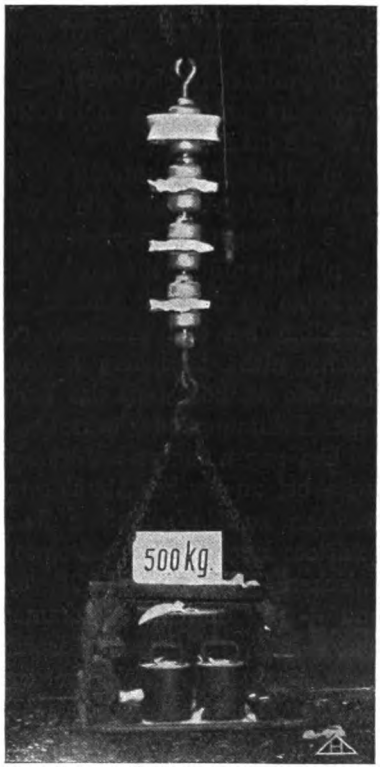


Abb. 15. Auf Zug beanspruchte Hängeisolatorenkette, unter Belastung von 500 kg mittels Pendelhammer bearbeitet, ohne Bruch des Porzellankernes.

Als einfachste Probe der Porosität ist die Tintenprobe bekannt und auch in den Prüfvorschriften[1]) des V. D. E. aufgenommen. Sie besteht bekanntlich darin, daß man auf die frische Bruchfläche einen Tropfen Tinte oder sonstige Farbflüssigkeit (z. B. 1 g Fuchsin gelöst in 100 g Methylalkohol) aufbringt und beobachtet, ob die Flüssigkeit

[1]) ETZ. 1922, S. 32.

Digitized by Google

auf der Bruchfläche verläuft oder randscharf trocknet. Nach Abspülen mit reinem Methylalkohol darf keine nennenswerte Spur von der Farblösung zurückbleiben. Im Zweifelsfalle ist durch Zerschlagen der Prüfstücke festzustellen, ob das Färbemittel in das Porzellan eingedrungen ist, oder ob es nur durch Kapillarwirkung an der körnigen Oberfläche festgehalten wird.

Die in Amerika vorgeschlagene Porositätsprüfung unter hohem Druck erübrigt sich für gutes deutsches Porzellan[1]).

f) Spezifisches Gewicht. Das spezifische Gewicht gargebrannten Porzellans beträgt je nach Zusammensetzung und Brenntemperatur etwa 2,3 bis 2,4.

g) Elastizitätsmodul. Dieser liegt zwischen 680000 und 780000 kg/cm², wobei die Durchbiegung einseitig eingespannter bzw. auf 2 Stützen frei gelagerter Stäbe bestimmt wurde.

h) Wärmebeständigkeit. Die Temperaturbeständigkeit von Porzellan in dem für andere Isolierstoffe üblichen Sinne braucht, da Porzellan bei den praktisch vorkommenden Temperaturen nicht erweicht, nicht besonders hervorgehoben zu werden. Von gewissem Interesse ist höchstens das Verhalten des Porzellans gegenüber plötzlicher Erhitzung oder schroffen Temperaturwechseln.

Um gegen innere Materialspannungen, wie sie immerhin beispielsweise bei zu rascher Abkühlung des Brenngutes vorkommen könnten, gesichert zu sein, schreiben die Prüfungsvorschriften des V. D. E.[2]) für gekittete Hochspannungs-Isolatoren einen 3maligen Temperaturwechsel zwischen + 15° und + 90° vor (für Hängeisolatoren zwischen + 15° und + 75° und für zusammenglasierte Isolatoren zwischen + 15° und + 65°, da derartige Isolatoren erfahrungsgemäß weniger leicht spannungsfrei hergestellt werden können).

Die Frostbeständigkeit scheidet ohne weiteres aus, da Porzellan in dieser Beziehung unbedingte Sicherheit gewährt.

Das gleiche gilt für die

i) Brennbarkeit und Entflammbarkeit. Was die Lichtbogensicherheit anbetrifft, so hängt die Einwirkung ganz von der im Lichtbogen enthaltenen Leistung ab. Lichtbögen, wie sie bei Prüfungen im Laboratorium auftreten, bleiben ohne jeden Einfluß auf die Beschaffenheit des Porzellans. Lichtbögen im Betriebe, bei denen größere Leistungen in Betracht kommen, hinterlassen meist nur Spuren geschmolzener Glasur auf der Oberfläche des Isolators. Im Falle eines Durchschlags schmilzt dagegen die ganze Durchschlagsstelle zusammen.

Falls im Betrieb ein außen um den Isolator schlagender Lichtbogen längere Zeit stehen bleibt, was durch entsprechende Mittel unbedingt

[1]) Rieke-Gary, Berichte d. Deutschen Keram. Ges. Bd. 3, Heft 1, 1922, S. 18.
[2]) ETZ. 1920, S. 740; 1922, S. 27; 1922, S. 1347.

Digitized by Google

verhindert werden sollte, würde dies natürlich eine Zerstörung des Isolators zur Folge haben, weshalb man nach einem Vorschlag von Nicholson[1]) Lichtbogenschutzringe oder Hörner um die Isolatoren anordnen kann, die den Lichtbogen von den Porzellanteilen fernhalten sollen (vgl. S. 139).

Durch Funken- (also nicht Lichtbogen)überschläge wird Porzellan in Luft nie angegriffen. Indessen ist bemerkenswert, daß dies unter Öl geschieht, indem das Porzellan dann von den Entladungen auf der Oberfläche gewissermaßen aufgerissen wird. Infolgedessen ist bei Apparaten, bei denen Porzellan unter Öl verwendet wird, auf Einhaltung eines genügend großen Isolationsweges zu achten.

Daß das Porzellan durch Säuren, Alkalien, Öl und dergleichen nicht im geringsten angegriffen wird, ist bekannt. Gerade seine große Widerstandsfähigkeit gegen die Atmosphärilien hat ihm ja seit Jahrzehnten in erster Reihe zu seiner beherrschenden Alleinstellung als Freileitungsisolator verholfen.

Hochspannungsprüfung.

Die Prüfung von Hochspannungsisolatoren erfolgt im allgemeinen mittels hochgespanntem technischem Wechselstrom von 50 Perioden. Über die Zweckmäßigkeit der namentlich in Amerika vor einigen Jahren stark empfohlenen Hochfrequenzprüfung[2]) sind die Ansichten zur Zeit noch recht geteilt. Dagegen scheint eine auch in Deutschland neuerdings verschiedentlich versuchte Stoßprüfungsanordnung, bei der die Isolatoren einer schlagartigen elektrischen Beanspruchung ausgesetzt werden, erhöhte Bedeutung zu beanspruchen.

Grundsätzlich muß man scharf zwischen zwei verschiedenen Prüfarten unterscheiden, für deren kurze sachliche Kennzeichnung die Bezeichnung Formprüfung und Stückprüfung gewählt werden möge. Die Formprüfung dient dem Zwecke, die Sicherheit des Isolators gegen äußere Überschläge im Betriebe unter ungünstigsten Witterungsbedingungen, also namentlich bei starkem Regen oder Nebel nachzuprüfen. Da diese Überschlagswerte nicht von der Güte des Porzellans, sondern lediglich von der äußeren Form des Isolators, in Sonderheit zweckmäßiger Anordnung der Regenschutzmäntel usw. abhängen, genügt es, wenn diese Prüfung sich auf Stichproben beschränkt. Bei den gängigen Isolatormodellen, für welche genügend Erfahrungswerte über die Höhe der Überschlagswerte und den in dieser Beziehung gegebenen Sicherheitsgrad vorliegen, erübrigen sich diese Prüfungen überhaupt. Mit Recht hat daher der V. D. E. in den „Vorschriften für Prüfung von Isolatoren für Betriebsspannungen über 500 Volt bis einschließlich 35000 Volt“[3]) diese Prüfung für genormte Isolatoren überhaupt als entbehrlich bezeichnet.

[1]) Nicholson. Transact. AIEE. 1910, S. 573; Weicker, Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen 1910, S. 286. — [2]) Imlay-Thomas, Transact. AIEE. 1912, S. 2121; Creighton, Transact. AIEE. 1915, S. 465. — [3]) ETZ. 1922, S. 31.

Digitized by Google

Etwas anders ist es mit der Stückprüfung. Diese soll die Fehlerlosigkeit des Isolators inbezug auf Materialbeschaffenheit nachweisen. Dieser Prüfung sollte daher jeder Hochspannungsisolator, d. h. jedes einzelne Stück ohne Ausnahme unterworfen werden. Stichproben genügen hier keinesfalls, da bei der Eigenart der Porzellanfabrikation immerhin mit der Möglichkeit von inneren Fehlern gerechnet werden muß. Zur Durchführung dieser Prüfung besitzen alle größeren Porzellanfabriken eigene Prüffelder, die für die gleichzeitige Prüfung einer größeren Anzahl von Isolatoren eingerichtet sind. Die Prüfung erfolgt in der Weise, daß der Isolator umgekehrt mit dem Kopfe in ein Wasserbad

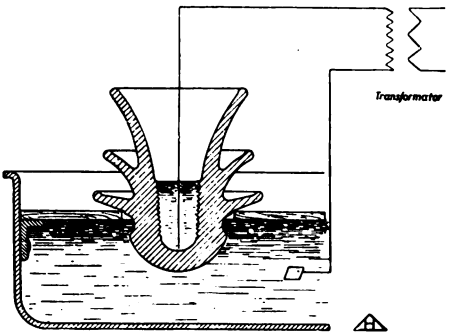


Abb. 16. Schematische Darstellung der Stückprüfung von Hochspannungsisolatoren.

Abb. 17. Hochspannungsprüffeld für Stückprüfungen (Massenprüfung von Isolatoren).

getaucht und der innere Hohlraum ebenfalls mit Wasser gefüllt wird, wie dies Abb. 16 schematisch veranschaulicht. Abb. 17 möge ein entsprechend eingerichtetes Prüffeld beispielsweise zeigen.

Digitized by Google

Die Höhe der Prüfspannung ist in den oben erwähnten Prüfungsvorschriften des V. D. E. zu 95% der Überschlagsspannung festgesetzt.

Jeweilige besondere Festsetzungen über die Höhe der Prüfspannung sind um so entbehrlicher, als bei den üblichen Prüftransformatoren und Prüfgeneratoren mit ihrer meist beschränkten Leistung von etwa 5 bis 50 (höchstens 300) kW je nach der Zahl der gleichzeitig geprüften Isolatoren leicht eine Verzerrung der Spannungskurvenform [1]) und damit eine Änderung der Effektivwerte bei gleichen Scheitelwerten eintritt. Gegebenenfalls ist daher eine Kontrolle des Scheitelfaktors mittels Kugelfunkenstrecke empfehlenswert.

Dagegen hat sich die Formprüfung auf die Einzelbestimmung der Überschlagswerte und ihrer Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen zu erstrecken. Die letzteren spielen dabei, wie bekannt, eine außerordentliche Rolle. Selbstverständlich sollten bei der Prüfung die ungünstigsten in der Natur vorkommenden Verhältnisse nachgeahmt werden. Diese sind im allgemeinen heftiger Platzregen, starker Nebel und endlich Schneetreiben bei Temperaturen über dem Nullpunkt. Aus den über diese Verhältnisse veröffentlichten eingehenden Untersuchungen [2]) seien hier nur einige wenige hervorgehoben.

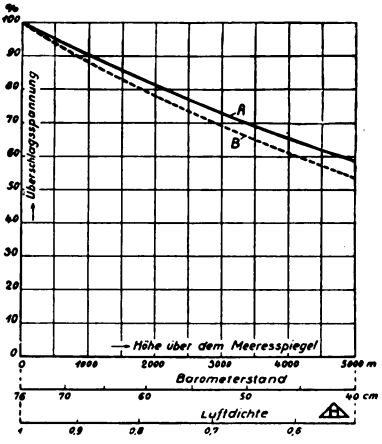


Abb. 18. Überschlagspannung von Isolatoren in Abhängigkeit von der Luftdichte.

Zunächst müssen die Isolatoren in einer den wirklichen Betriebsverhältnissen möglichst entsprechenden Weise aufgestellt werden, also Freileitungsisolatoren auf eine eiserne Stütze normalen Durchmessers mit einer in normalem Abstand darunter angeordneten Traverse. Der Leitungsdraht ist in der Halsrille, nicht Scheitelrille, zu verlegen. Er muß genügend lang sein und entsprechenden Durchmesser besitzen.

Für die Trockenüberschlagsspannung ist Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit von Einfluß. Diese sind also bei der Messung zu berücksichtigen. In welcher Weise beispielsweise der Luftdruck, mit dem bekanntlich die Durchbruchsspannung in Luft annähernd proportional zunimmt, auf die Überschlagsspannung einwirkt, mag Abb. 18 zeigen. Dabei ist die untere Kurve unter der Voraussetzung gezeichnet, daß die Überschlagsspannung sich genau proportional mit der Luft-

[1]) Dahl, Bulletin SEV. 1922, S. 461. — [2]) Journal AIEE. Juli 1923, S. 739; Weicker, Zur Beurteilung von Hochspannungs-Freileitungsisolatoren usw., Dissertation Dresden 1910; ETZ. 1910, S. 853.

Digitized by Google

dichte ändere. Dies ist für Isolatoren nicht ganz der Fall, vielmehr nimmt die Überschlagsspannung in Wirklichkeit, wie die obere Kurve zeigt, etwas weniger stark ab[1]).

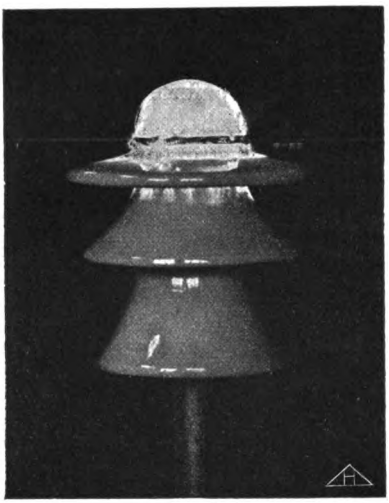


Abb. 19. Glimm- und Gleitentladungen am Kopf eines Isolators bei der Trockenprüfung.

Abb. 20. Von den Regentropfen ausgehende Büschelentladungen nach kurzzeitiger Beregnung.

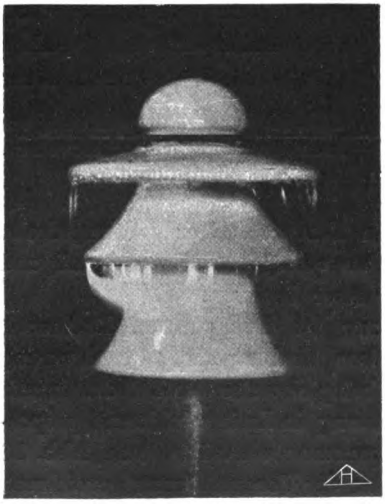


Abb. 21. Vorentladungen zwischen mittlerem Mantel und Hülse bei länger dauernder Beregnung.

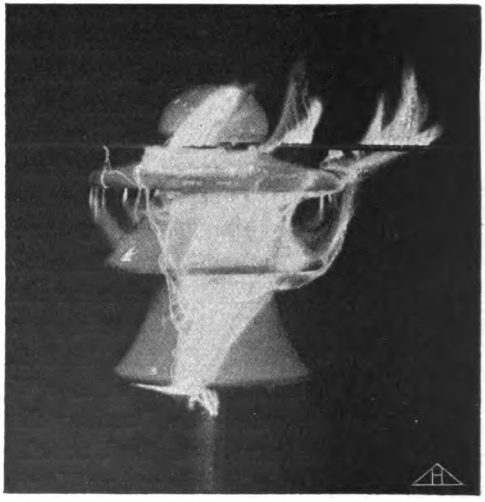


Abb. 22. Lichtbogenentladungen bei weiterer Spannungssteigerung.

[1]) Peek, Transactions AIEE. 1914, S. 1721.

Digitized by Google

Den Charakter der Entladungserscheinungen für verschiedene Versuchsverhältnisse, in Sonderheit für trockenen Zustand und verschieden lange Beregnungsdauer mögen die Abb. 19—22 veranschaulichen.

Bei Regenversuchen[1]) sind bei der Bestimmung der Höhe der Überschlagsspannung eine Reihe von Einflüssen besonders zu beachten, unter denen vor allem die Stärke, die Richtung, die Dauer und die Leitfähigkeit des künstlichen Regens hervorzuheben ist. Namentlich die im allgemeinen weniger beachtete große Veränderlichkeit der Regenüberschlagsspannung bei verschiedener Leitfähigkeit sei besonders hervorgehoben[2]). Dieser Einfluß der Wasserleitfähigkeit hängt etwas von der Form des betreffenden Freileitungsisolators ab und zwar ist die Regenüberschlagspannung gegenüber dem Trockenwert

bei Beregnung mit destilliertem Wasser um etwa 10 bis 20% niedriger,
„ aufgefangenem natürlichen Regenw. um etwa 15 bis 20% „
„ gewöhnlichem Leitungswasser 40 bis 50% „

Verwendung.

Unter den vielen Anwendungsgebieten des Porzellans für Isolierzwecke der Elektrotechnik, die in großen Porzellanfabriken die Führung mehrerer tausend verschiedener Modelle bedingen, sei im folgenden hauptsächlich das große Gebiet der Freileitungsisolatoren behandelt.

Man unterscheidet bekanntlich unter Freileitungsisolatoren solche für Schwachstromzwecke, d. h. für Fernmelde- und Signalanlagen im weitesten Sinne des Wortes (also vornehmlich Zwecke der Telegraphie und Telephonie), sodann solche für Niederspannungsstarkstromleitungen und endlich Isolatoren für Hochspannungsleitungen. Außerdem wären noch einige Sonderanwendungen, wie z. B. für Zwecke der drahtlosen Telegraphie zu nennen.

Die Schwachstromisolatoren, als deren Hauptvertreter das allbekannte Reichspostmodell in den drei Größen von 141, 100 und 80 mm Höhe gelten kann und das im Jahre 1922 den 60jährigen Gedenktag seiner Einführung in Preußen feiern konnte, haben sich auch erst im Laufe der Jahre zu ihrer heutigen Form entwickelt. Ursprünglich besaßen die ersten Freileitungsisolatoren nur einen einzigen Mantel und keine Kopfrille. Vielmehr wurde der damals allein verwendete Kupferdraht nur einmal um die Halsrille des Isolators gelegt (Abb. 23). Erst nach Einführung des Eisendrahtes (etwa 1852) wurde der Isolator auch mit einer oberen Kopfrille versehen, um eine leichtere Bindung zu ermöglichen. Immerhin scheinen damals ziemlich viel Kopfbrüche aufgetreten zu sein, wenigstens wurden aus diesem Grunde vor-

[1]) Weicker, Elektrotechnik u. Maschinenbau 1923, S. 429.
[2]) Weicker, Helios 1921, S. 181; Elektro-Journal April 1921, S. 11; ETZ. 1921, S. 1475; EKB. 1922, S. 139; ETZ. 1923, S. 336.

Digitized by Google

übergehend eiserne Isolierglocken mit eingekittetem Porzellanfutter (Abb. 24) verwendet.

Selbstverständlich erwies sich dieser Isolator infolge seines viel zu kurzen Isolationsweges nicht als brauchbar. Man kam daher im Jahre 1857 auf Grund der Beratungen einer besonderen Kommission von Gelehrten und Fachmännern wieder zu dem reinen Porzellanisolator zurück und zwar in Form des sogenannten Kommissionsisolators, der sich (Abb. 25) durch große Länge und geringen Durchmesser auszeichnet. Indessen erst der im folgenden Jahre von dem damaligen preußischen Generaldirektor Chauvin vorgeschlagene Doppelglockenisolator (Abb. 26) konnte allen Anforderungen genügen. Der Hauptunterschied besteht in der Zufügung eines weiteren Mantels, der

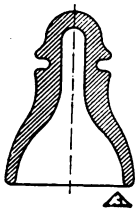


Abb. 23. Erste Form von Isolierglocken nach Werner Siemens (etwa 1850).

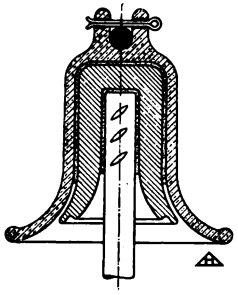


Abb. 24. Eiserne Isolierglocke mit eingekittetem Porzellanfutter.

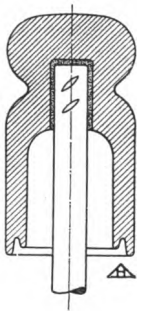


Abb. 25. Sogenannter Kommissionsisolator (1857).

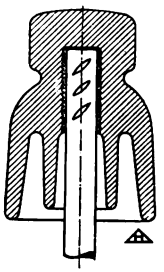


Abb. 26. Erste Porzellandoppelglocke (1858).

auch bei Zertrümmerung des äußeren Mantels eine gewisse Isolierfähigkeit verbürgt. Der Hauptvorteil der Einfügung des zweiten Mantels soll darin beruhen, daß die Wärmeausstrahlung der inneren Glocke vermindert und dadurch der Niederschlag von Feuchtigkeit auf den Innenseiten der Mäntel verhindert wird, wobei die zwischen den beiden Glocken in dem engen Hohlraum befindliche Luft als Wärmeschutz dient. Hauptsächlich jedoch dürfte der durch den zweiten Mantel geschaffene längere Isolationsweg und der bessere Regenschutz die erhöhte Isolierfähigkeit der Doppelglocke bedingen.

Wenn sich diese grundsätzliche Anordnung der Mäntel für Schwachstromisolatoren auch vorzüglich bewährt und allgemein eingebürgert hat, so weichen nichtsdestoweniger die äußeren Formen der Isolatoren und z. T. auch die Befestigungsweise des Leitungsdrahtes in den einzelnen Ländern außerordentlich voneinander ab. So haben nicht nur fast sämtliche Kulturstaaten der Welt ihre eigenen Isolatoren, sondern es führen auch in Deutschland die Bahnverwaltungen der einzelnen früheren

Digitized by Google

Bundesstaaten und ehedem sogar größere Privatwerke ihre eigenen Modelle. Einige der charakteristischsten Formen sind in Abb. 27 zusammengestellt.

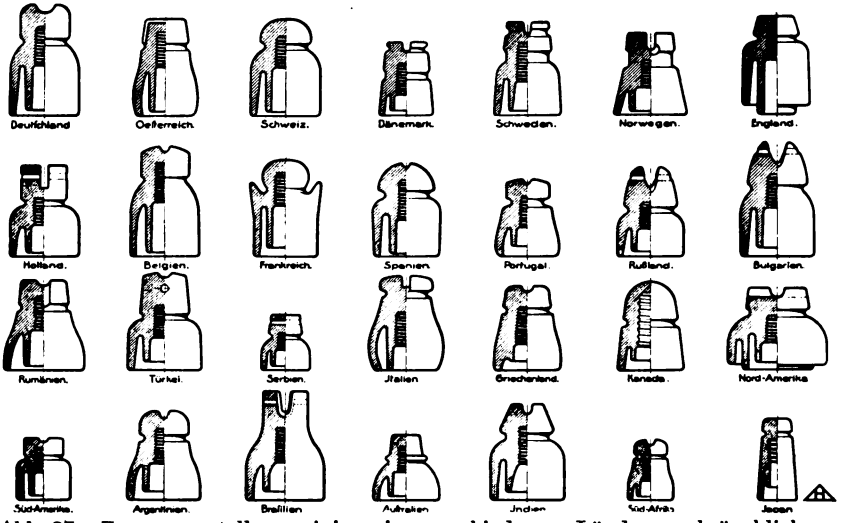


Abb. 27. Zusammenstellung einiger in verschiedenen Ländern gebräuchlicher Schwachstromisolatoren.

Eine besondere Art der Schwachstromisolatoren bilden die Kabeleinführungsisolatoren, von denen die verschiedensten Konstruktionen durchgebildet worden sind, um einen möglichst verlustfreien Übergang einer Schwachstromfreileitung in das Innere der Gebäude zu erreichen.

Eine ähnliche Mannigfaltigkeit der Formen wie bei den Schwachstromisolatoren findet sich oder fand sich auch bei den für Starkstromzwecke bestimmten Niederspannungsisolatoren. Da für diese infolge der starken Leitungsdrähte lediglich eine mechanisch kräftigere Konstruktion und größere Halsrille nötig wurde, so genügten hierfür entsprechend umgeänderte Schwachstromisolatorenmodelle. So ist für Starkstromzwecke das deutsche Reichsmodell, jedoch mit weiterer Halsrille sehr beliebt gewesen. Auch kürzere, gedrungenere 3-Mantel-Isolatoren ähnlicher Form nach Abb. 28, wurden viel verwendet. Daneben finden jedoch mit Recht immer mehr auch abweichend gebaute Modelle, wie der bekannte R.T.J.-Isolator Aufnahme, bei denen die größere mechanische Beanspruchung als Starkstromisolator auch äußerlich zum Ausdruck kommt. Bei der vom V.D.E. durchgeführten Normung der Niederspannungsisolatoren bis 500 Volt Betriebsspannung gegen Erde[1]) ist

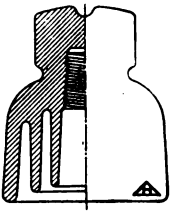


Abb. 28. Dreimantelisolator als Niederspannungsstarkstromisolator.

[1]) ETZ. 1922, S. 27.

Digitized by Google

daher auch eben dieser Isolator (Abb. 29), und zwar in drei verschiedenen Größen für Leitungsquerschnitte bis 10 qmm, bis 35 qmm und bis 150 qmm gewählt worden und damit endlich auch äußerlich eine klare Scheidung zwischen Starkstrom- und Schwachstromleitungen durchgeführt worden[1]). Für Abspannpunkte ist außerdem ein besonderer Schäkel-Isolator, d. h. ein Isolator mit durchgehendem Bolzen, genormt, der auch für die größten vorkommenden Drahtzüge ausreicht.

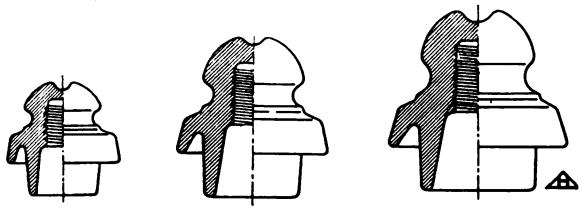


Abb. 29. Genormte Niederspannungsstarkstromisolatoren.

Für Hochspannungs-Isolatoren kommen noch einige weitere wesentliche Gesichtspunkte in Betracht, nämlich vor allem hinreichende Durchschlagssicherheit und Sicherheit gegen Randentladungen. Der ersteren Forderung muß durch Wahl entsprechender Scherbenstärken, bzw. Unterteilung des Isolators in mehrere Einzelteile und sinngemäße konstruktive Durchbildung, der zweiten Forderung durch Wahl entsprechender äußerer Abmessungen und zweckentsprechende Formgebung Rechnung getragen werden.

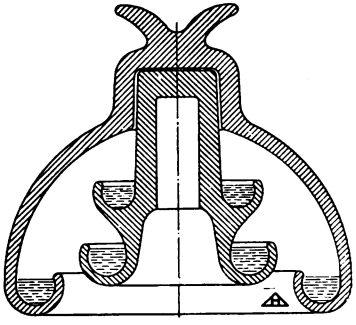


Abb. 30. Ölisolator der Versuchsanlage Lauffen-Frankfurt (1891).

Die ersten Hochspannungsisolatoren waren ganz ähnlich wie die Starkstromniederspannungsisolatoren den Schwachstromisolatoren nachgebildet worden und entsprachen diesen in der äußeren Form fast völlig.

Inzwischen waren jedoch in Deutschland die bereits in den sechziger Jahren für Schwachstromzwecke erfundenen Ölisolatoren wieder aufgegriffen worden. Hierzu gehört der auf der denkwürdigen ersten Kraftübertragungsanlage Deutschlands von Lauffen nach Frankfurt im Jahre 1891 benutzte Isolator (Abb. 30), bei dem drei Ölkammern über- bzw. nebeneinander angeordnet waren. Wenn auch mit ihm vorübergehend die Spannung bis zu 30 000 oder 40 000 Volt gesteigert werden konnte[2]), mußte der Isolator doch in elektrischer Beziehung für Hochspannungszwecke als völlig verfehlt gelten; denn für Hochspannungsisolatoren spielt die Oberflächenisolation eine ganz untergeordnete Rolle. Worauf es bei

[1]) Weicker, Elektro-Journal. Januarheft 1922, S. 17. — [2]) ETZ. 1891, S. 61; V.D.E. — Festschrift 1916, „Das Entstehen der elektrischen Kraftübertragung Lauffen—Frankfurt" S. 38.

Digitized by Google

Hochspannungsisolatoren ankommt, ist in erster Reihe die genügende Sicherheit gegen Randentladungen, d. h. gegen Entladungen, die vom Leitungsdraht längs der Isolatormäntel oder über die zwischen diesen befindliche Luftstrecke hinweg nach der Stütze erfolgen.

Von diesem Gesichtspunkte aus wurde die ursprünglich nur für Niederspannungszwecke dienende Isolatorform immer mehr ausgebildet. Zunächst wurde ein weiterer Zwischenmantel eingeschoben, der zwar ursprünglich auch dem Zwecke einer Erhöhung der Oberflächenisolation dienen sollte, hier aber zugleich zu einer Vergrößerung des Abstandes nach dem Isolatormantelrand führte.

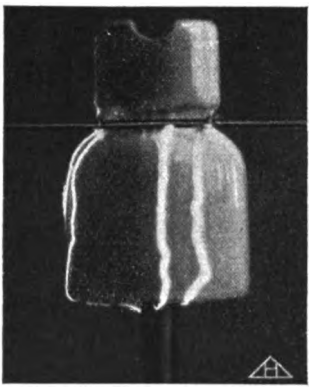


Abb. 31. Entladungen an einem trockenen Isolator vom Leitungsdraht nach der Stütze.

Um den Wert einer Vergrößerung gerade dieser auch bei Regen trocken bleibenden nutzbaren Schlagweite zu veranschaulichen, sei der Überschlag eines derartigen Isolators im trocknen Zustand (Abb. 31) und bei Regen (Abb. 32) gezeigt.

Während die Entladungen in trocknem Zustand vom Leitungsdraht nach der Stütze verlaufen (im vorliegenden Falle bei 70 bis 80 000 Volt), gehen sie bei Regen, da dann der ganze äußere Mantel naß ist, vom unteren Rande dieses Mantels aus, und zwar bei einer Spannung von kaum 20 000 Volt. In diesem Sinne mußte eine Entwicklung des Isolators nach der Breite von Vorteil sein, wie sie sich auch bei einer Anzahl älterer Modelle findet. Teilweise ist bei diesen Isolatoren auch bereits durch schräge Anordnung des äußeren Mantels auf eine sinngemäße Vergrößerung dieses Abstandes, also der nutzbaren Schlagweite hingearbeitet worden. Auch durch Anordnung mehrerer übereinanderstehender Mäntel mit allerdings recht engem Hohlraum suchte man das gleiche Ziel zu erreichen.

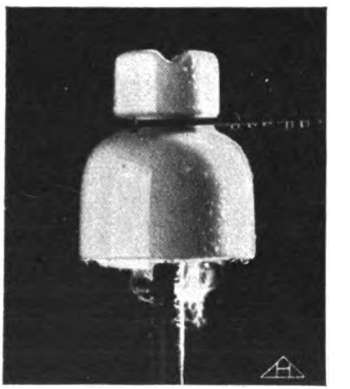


Abb. 32. Entladungen an einem nassen Isolator vom Mantelrand nach der Stütze.

Eine wirklich grundlegende Änderung in der Form der Hochspannungsisolatoren brachte indessen erst die Erfindung der Deltaglocke durch die Porzellanfabrik Hermsdorf S.-A. im Jahre 1897, in der die Breitenentwicklung des Isolators, bei gleichzeitiger Wahrung

Digitized by Google

guten gegenseitigen Regenschutzes der einzelnen Mäntel aufs vollkommenste durchgebildet ist (Abb. 33). Allerdings hat auch die ursprüngliche Form der Deltaglocke im Laufe der nächsten 25 Jahre auf Grund vieler systematischer Versuche weitere Verbesserungen erfahren, auf die im einzelnen einzugehen zu weit führen würde. Soweit die äußere Form in Betracht kommt, bewegte sich die Entwicklung dabei hauptsächlich in dem Sinne, die nutzbare Schlagweite unter Beibehaltung eines bestimmten Produktes von Durchmesser und Höhe, das für die Gestehungskosten des Isolators in erster Reihe maßgebend ist, nach Möglichkeit zu vergrößern und die Hohlräume zwischen den einzelnen Isolatormänteln weit genug zu halten, um eine Verschmutzung zu verhindern.

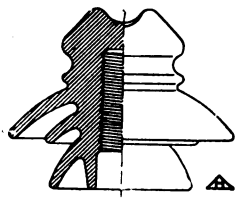


Abb. 33. Ursprüngliche Form der Deltaglocke (1897).

Die äußere Form des Hochspannungsfreileitungsisolators kann hiermit, wenigstens für Betriebsspannungen bis etwa 35 000 Volt wohl als feststehend angesehen werden. Dies ist auch seitens des V.D.E. dadurch zum Ausdruck gekommen, daß eben diese Isolatorform (Abb. 34) den Normen für Hochspannungsisolatoren zugrunde gelegt wurde[1]).

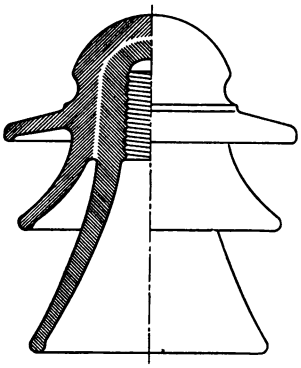


Abb. 34. Neuere Form der Deltaglocke, vom V.D.E. genormt für Betriebsspannungen bis 35 000 Volt.

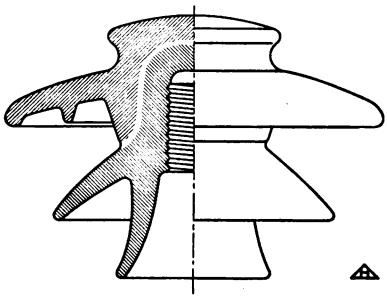


Abb. 35. Weitschirmisolator.

Daneben hat namentlich für höhere Betriebsspannungen in letzterer Zeit ein von der Porzellanfabrik Schomburg in Anlehnung an amerikanische Isolatorformen[2]) eingeführter Isolator größere Verbreitung gefunden, der sogenannte Weitschirmisolator[3]) (Abb. 35). Dieser zeichnet sich durch möglichste Anpassung der eigentlichen Isolatorkernform an die Feldlinien aus, während die Regenschutzmäntel senkrecht zu diesen Feldlinien angeordnet sind. Hierdurch werden gleichzeitig verhältnis-

[1]) ETZ. 1922, S. 27.
[2]) Gilchrest, Transact. AIEE. 1918, S. 805; ETZ. 1920, S. 917.
[3]) Schwaiger, ETZ.-Festschr. 1923, S. 39; Scheid, E. u. M. 1923, S. 253.

Digitized by Google

mäßig weite Hohlräume zwischen den einzelnen Mänteln geschaffen und das Entstehen von Glimmentladungen an dieser Stelle verzögert.

Der diesem Isolator weiter eigentümliche niedrige Kopf ermöglicht die Verwendung kürzerer und damit häufig auch schwächerer Eisenstützen, ohne daß nach vielfachen Versuchen zu befürchten wäre, daß bei übermäßig großen Zugbeanspruchungen des Leitungsdrahtes der Isolatorkopf abgerissen würde.

Mit diesen Delta- und Weitschirmisolatoren dürfte die Entwicklung der äußeren Gestaltung von Hochspannungs-Freileitungsisolatoren, wenigstens der bisher gebräuchlichen Grundform, zu einem gewissen Abschluß gelangt sein.

Was die Durchschlagssicherheit anbelangt, so ist gerade in neuerer Zeit die Frage der zweckmäßigsten Herstellungsweise in weiteren Kreisen lebhaft erörtert worden, so daß hierauf noch kurz eingegangen werden möge.

Die ersten Hochspannungsisolatoren bestanden, wie nach ihrem Entwicklungsgang zu erwarten, aus einem einzigen Stück, dessen Scherbenstärke mit Rücksicht auf die höhere elektrische Beanspruchung entsprechend stärker gewählt wurde. Vielfache mit der Erhöhung der Betriebsspannungen verbundene Durchschläge infolge fehlerhafter Stücke führten bald dazu, die Isolatoren aus mehreren getrennten Einzelteilen herzustellen.

Die beiden Teile wurden dabei entweder mittels Zusammenbrennens im Porzellanofen, oder mittels Zusammenkittens vereinigt, nachdem die einzelnen Teile zuvor jedes für sich glatt gebrannt waren. Das erste Verfahren, das Zusammenglasieren, hat den Nachteil, daß die Isolatorteile vor dem Zusammenbrennen nicht einzeln geprüft werden können. Auch besteht, wenigstens bei den größten zusammengebrannten Modellen, eine gewisse Gefahr innerer Spannungen. Außerdem besitzen diese Isolatoren auch eine durch die unvermeidlichen Hohlräume bedingte etwas geringere Bruchfestigkeit. Immerhin sind die mit zusammengebrannten Isolatoren gemachten Betriebserfahrungen im ganzen nicht ungünstig.

Mehrteilig zusammengekittete Isolatoren haben demgegenüber den Hauptvorteil, daß die einzelnen Teile für sich gebrannt und für sich geprüft werden können, jeder Fabrikationsfehler also schon von vornherein mit größter Wahrscheinlichkeit gefunden wird.

Das Hauptbedenken, das gegen diese Isolatoren erhoben wird, ist nur das, daß sie eben gekittet sind und daß in dieser Beziehung recht ungünstige Betriebserfahrungen gemacht worden sind, die durch Kopfsprünge verursacht wurden. Durch außerordentlich sorgfältig durchgeführte Untersuchungen namhafter Fachleute, nicht zuletzt auch die unausgesetzten Bemühungen der führenden Porzellanfabriken selbst, ist es gelungen, die Ursache der Sprünge zweifellos aufzuklären, und zwar liegt die Hauptursache, wenn nicht die alleinige Schuld, an der ver-

Digitized by Google

schiedenen Ausdehnung von Zement und Porzellan bei der Erwärmung sowie bei der Feuchtigkeitsaufnahme des Zements[1]). Bei dem fast dreimal so großen Wärmeausdehnungskoeffizienten der früher meist verwendeten Zementmischungen mußten, wenn der Kitt im Laufe der Jahre völlig erhärtet und unnachgiebig geworden war, im äußeren Porzellanteil Spannungen auftreten, die dann zu den gefürchteten Kopfsprüngen führten[2]).

Nachdem es jedoch gelungen ist, Zementmischungen herzustellen, die annähernd den gleichen Wärmedehnungskoeffizienten wie Porzellan besitzen, und den Zement gegen Feuchtigkeitsaufnahme zu schützen[3]), kann damit die Gefahr der Kopfsprünge wohl endgültig als behoben angesehen werden. Auch die zweckmäßigere Ausbildung und geringe Stärke der Kittfugen ist von günstigem Einfluß.

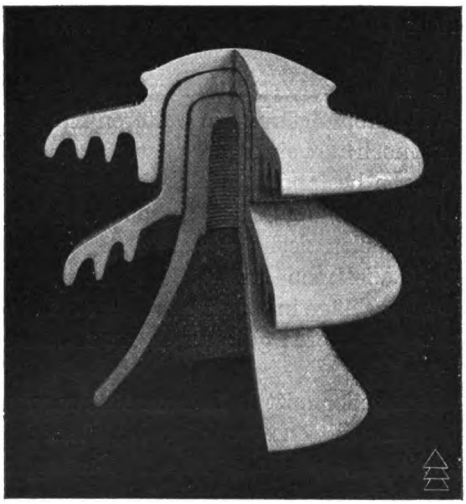


Abb. 36. Dreiteilig zusammengehanfter Isolator.

Selbstverständlich hat es nicht an Bemühungen gefehlt, die Vorteile der Unterteilung eines Isolators in mehrere für sich gebrannte lose Teile auf andere Weise zu erreichen, ohne die Teile starr miteinander zusammenkitten zu müssen. Hierzu gehört z. B. das Zusammenschrauben beider Teile mit Porzellangewinde. Dieses Verfahren hat sich indessen hauptsächlich aus Fabrikations-, teilweise auch aus Montagerücksichten nicht recht bewährt. Viel zweckmäßiger ist eine Herstellungsweise, bei der nur der äußere Porzellanteil Gewinde erhält, der innere Teil jedoch nur Riefen oder Aufrauhungen, auf die Hanf oder ein ähnliches nachgiebiges Packmaterial aufgebracht wird[4]).

Die einzelnen Teile (auch 3-teilige Isolatoren können nach diesem Verfahren ohne weiteres hergestellt werden) werden dann in ähnlicher Weise aufeinandergedreht, wie dies bei dem Aufdrehen eines einteiligen Isolators auf eine hanfumwickelte Stütze schon lange bekannt und bewährt ist. Der mit Öl oder dergleichen zum Schutze gegen Feuchtigkeit getränkte Hanf bildet dabei eine dauernd nachgiebige Schicht,

[1]) Kallevang, El. World, 1919, Bd. 74, S. 1063. — [2]) Austin, Transact. AIEE. 1914, S. 1731; Meyer, ETZ. 1919, S. 174. — [3]) Creighton-Hunt, Transact. AIEE. 1921, S. 1173; Bültemann, Dr., ETZ. 1921, S. 1266.

[4]) D.R.G.M. der Porzellanfabrik Hermsdorf.

Digitized by Google

die das Auftreten innerer Materialspannungen mit Sicherheit verhindert. Dabei ist es bei Anwendung geeigneter Hilfswerkzeuge leicht möglich, die Teile so fest miteinander zu vereinigen, daß ein Lösen im Betriebe selbst bei nach oben gerichteten Zugkräften völlig ausgeschlossen ist.

Der Vollständigkeit halber seien endlich noch die sogenannten Metallschirm-Isolatoren[1]) erwähnt. Hauptkennzeichen dieser Isolatoren sind die gleichmäßige Feldverteilung und günstigere Durchschlagsbeanspruchung (um etwa 20 bis 25% höhere Öldurchschlagsfestigkeit), nahezu gleich hohe Trokken- und Regenüberschlagsspannung, Schutz des Leitungsdrahtes gegen Abschmelzen bei Durch- und Überschlägen, indem die verhältnismäßig große Metallmasse die entstehende Wärme aufnimmt und ableitet. Diese Wirkung kommt besonders in Verbindung mit metallischen Schutzbügeln um die Stütze zur Geltung, die zusammen mit dem Metallschirm in elektrischer und thermischer (vgl. S. 127) Beziehung gewissermaßen eine Sicherheitsfunkenstrecke bildet (Abb. 37 und 38). Voraussetzung ist dabei allerdings, daß der Abstand groß genug ist, um nicht durch zwischenfliegende Vögel überbrückt zu werden.

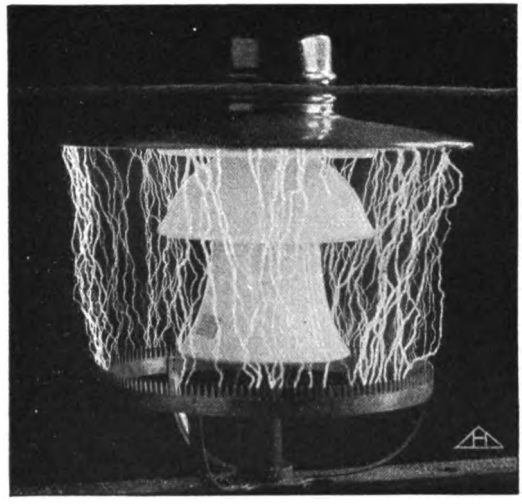


Abb. 37. Metallschirmisolator mit Schutzring als Sicherheitsfunkenstrecke wirkend.

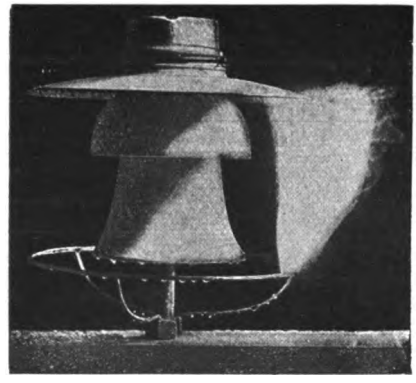


Abb. 38. Lichtbogen, durch den Schutzring und Metallschirm vom Isolator ferngehalten.

Hängeisolatoren.

Neben den Stützenisolatoren haben in den letzten Jahren die Hängeisolatoren immer mehr an Bedeutung gewonnen[2]). Die Art der

[1]) Weicker, EKB. 1909, S. 301, 1910, S. 286. — [2]) Weicker, Helios, 1911, Heft 28—30; Seefehlner, E. u. M. 1913, S. 157; Kock, Helios, 1921, S. 73.

Digitized by Google

Montage der Isolatoren kann wohl als bekannt vorausgesetzt werden. Nur der Vollständigkeit halber sei, um die grundsätzlich verschiedene Anordnung und Beanspruchungsweise der Hänge- und Abspann-

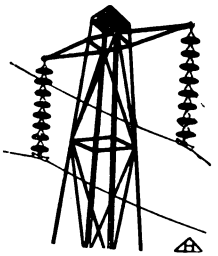


Abb. 39. Tragmast mit Hänge (Trag-)isolatoren.

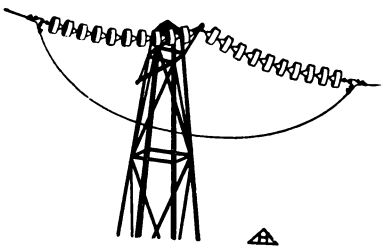


Abb. 40. Abspannmast mit Hänge- (Abspann-)isolatoren.

isolatoren zu veranschaulichen, in Abb. 39 und 40 die Leitungsführung je an einem Trag- und Abspannmast schematisch dargestellt.

In bezug auf die Formgebung[1]) kann man 3 Hauptformen unterscheiden, die in Abb. 41 schematisch, um die grundsätzlichen Unterschiede möglichst deutlich hervortreten zu lassen, gegenüber gestellt sind:

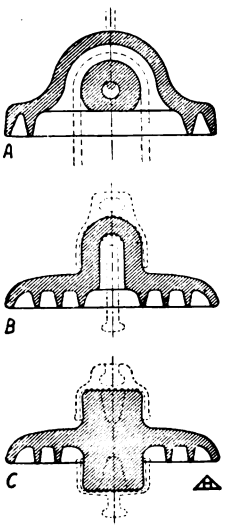


Abb. 41. Die drei Hauptformen von Hängeisolatoren:
A = Schlingenisolator,
B = Kappenisolator,
C = Doppelkappenisolator.

A. Isolatoren mit kettengliedartiger Verschlingung der durch entsprechende Kanäle im Isolator durchgezogenen Armaturteile. (Hewlett- oder Schlingenisolatoren.)

B. Isolatoren mit aufmontierter Kappe und einmontiertem Klöppel (Kappenisolatoren), wobei solche mit Kittbefestigung und mit kittloser Befestigungsweise der Armaturen unterschieden werden können.

C. Isolatoren mit je einer am oberen und unteren Ende befestigten Kappe oder sonstigen Armierung. (Doppelkappenisolatoren.)

Außer diesen drei, sowohl als Trag-, als auch als Abspannisolatoren verwendbaren Isolatorformen, besteht die Möglichkeit, für Abspannketten (event. auch für Tragketten) die sogenannten Schäkel-Isolatoren mit durchgehendem Bolzen und umgelegter Schelle zu verwenden, wie dies Abb. 42 veranschaulicht[2]).

Im übrigen ist es durchaus nicht erforderlich,

[1]) Weicker, ETZ. 1909, S. 597; Benischke, ETZ. 1910, S. 1131; Weicker, ETZ. 1911, S. 1262, ETZ. 1921, S. 1473; Perrochet, Bull. SEV. 1921, Heft 11, S. 299.
[2]) Weicker, ETZ. 1913, S. 1485, ETZ. 1921, S. 1473.

Digitized by Google

für Abspannketten, wie dies allerdings in Deutschland bisher meist üblich war, unbedingt eine andere äußere Isolatorform als für Tragketten zu verwenden. Vielmehr kommen im allgemeinen die für Tragketten verwendeten Hängeisolatoren, sofern sie nur genügende Bruchfestigkeit besitzen, unbedenklich auch für Abspannketten in Frage.

Der Vollständigkeit halber seien endlich noch die als Verbundisolatoren[1]) bezeichneten Ausführungsarten erwähnt, die hauptsächlich aus

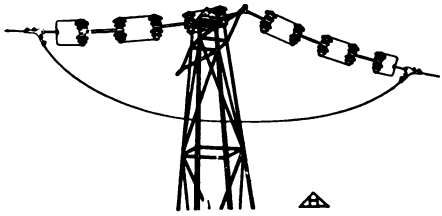


Abb. 42. Abspannmast mit Schäkel- (Abspann-)isolatoren.

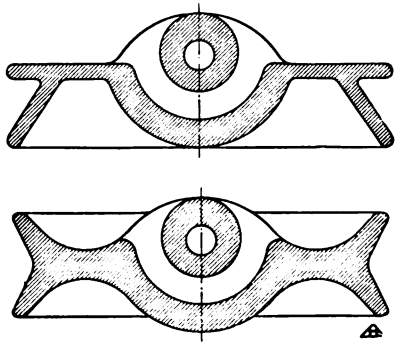


Abb. 43. Ursprüngliche Form amerikanischer Schlingenisolatoren (Hänge- und Abspanntype).

einem rein auf Zug beanspruchten Kern (aus beliebigem Isoliermaterial) und außen darum als Regenschutz angeordneten Porzellanmänteln bestehen.

Die älteste Ausführung des Hängeisolators ist der Schlingenisolator. Die ursprüngliche Form des aus Amerika übernommenen und dort

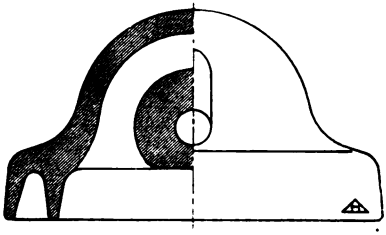


Abb. 44. In Deutschland gebräuchliche Form des Schlingenisolators (Hängetype).

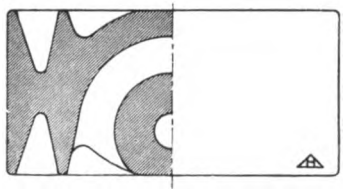


Abb. 45. In Deutschland gebräuchliche Form des Schlingenisolators (Abspanntype).

zuerst wohl im Jahre 1907[2]) verwendeten Isolators zeigt Abb. 43 als Hänge- und als Abspannisolator. In Deutschland ist die Form des Isolators verschiedentlich umgewandelt und verbessert worden. Die heutige, meist gebräuchliche Form dieses Hängeisolators zeigt Abb. 44. Gegenüber dem ursprünglichen Hängeisolator (Abb. 43) unterscheidet

[1]) ETZ. 1917, S. 518; AEG.-Mitteilungen, 1923, Heft 8, S. 258. Bag, Mitteilungen VEW. 1923, S. 385.

[2]) Die überhaupt erste Benutzung von Hängeisolatoren einfachster Form geht auf das Jahr 1900 zurück.

Digitized by Google

sich die neuere Form hauptsächlich dadurch, daß der eine Kanal horizontal, also nicht wie bei dem Abspannisolator gebogen geführt ist. Hierdurch wird vermieden, daß sich Wasser ansammeln kann, das unter Umständen den Isolator bei Frost gefährden, zum mindesten aber das Rosten des durchgeführten Seiles (wenn aus Eisen oder Stahl bestehend) begünstigen würde. Ferner ist die Unterseite des Tellers zur Vergrößerung des Überschlagsweges gerillt ausgeführt. Die Form des Abspannisolators (Abb. 45) ist dagegen in der Hauptsache beibehalten, nur ist auch hier eine stärkere Rillung zur Vergrößerung des Kriechweges zu erkennen. Der gebogene Verlauf des unteren Kanals schadet bei diesem Isolator natürlich nichts, da er ja als Abspannisolator nur in horizontal gespannten Ketten verwendet wird. Die Vereinigung der einzelnen Isolatorglieder erfolgt, wenigstens in Deutschland, ausschließlich mittels Kupfer- oder verzinkter Eisenseile von 35 bzw. 50 qmm Querschnitt. Die Seile enden, wenn sie nicht durch einfache Schrauben- oder Kerbverbinder vereinigt werden, in je einer Halbkugel. Verbunden werden diese Kugeln entweder mit Hilfe des sogenannten Bay-Verbinders bzw. diesem ähnlicher Konstruktionen. Einige dieser Verbinder ermöglichen auf leichteste Weise eine kreuzweise Führung der Seile, was für die Erhöhung der Regenüberschlagsspannung von nicht zu unterschätzendem Vorteil ist[1]). Die Aufhängung der ganzen Kette erfolgt entweder an beweglichen Rollen, wie sie Abb. 46 veranschaulicht, oder besser mit Hilfe besonderer Aufhängeösen. Die unterste Rolle trägt die Hängeklemme, in welche die Leitung eingelegt und darin festgeschraubt wird. Neuerdings sind auch verschiedene zur Kürzung der Kettenlänge und Vereinfachung der Montage bestimmte Sonderkonstruktionen durchgebildet worden.

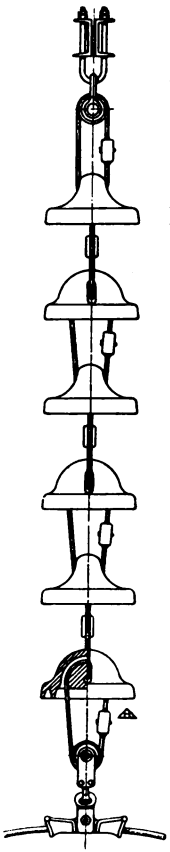


Abb. 46. 6gliedrige Schlingenisolatorenkette für 110 kV.-Betriebsspannung (Ausführung Kraftleitung Zschornewitz-Berlin).

Bezeichnend für Schlingenisolatoren ist, daß sie ausschließlich auf Druck beansprucht werden. Als Vorteil wird meist auch der Umstand angesehen, daß die Seilschlingen auch bei völligem Bruch des Isolators noch ineinandergreifen. Voraussetzung ist dabei allerdings, daß auch bei Über- bzw. Durchschlägen der Isolatoren und kräftigem Erdschlußlichtbogen die ineinander greifenden Seile nicht selbst verbrennen.

Die Kappenisolatoren zeichnen sich gegenüber den Schlingenisolatoren durch ihre symmetrische Form aus. Als Rotationskörper

[1]) Weicker, ETZ. 1921, S. 1476.

Digitized by Google

lassen sie sich ungleich leichter herstellen und besitzen infolgedessen auch eine wesentlich größere Durchschlagsfestigkeit. In bezug auf äußere Form sind die in den Abb. 47 bis 51 dargestellten Isolatoren

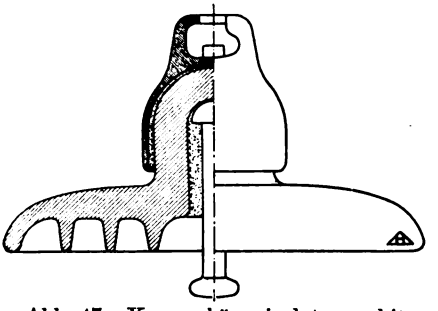


Abb. 47. Kappenhängeisolator gekitteter Ausführung.

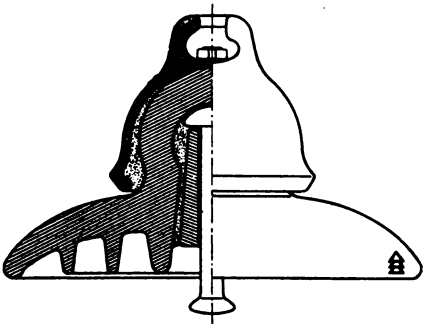


Abb. 48. Kappenhängeisolator gekitteter Ausführung, sogen. Untratype.

in Europa besonders üblich. Der Isolator nach Abb. 48 ist als sogenannte Untratype bekannt, da er erstmalig in der 100000 Voltleitung Untra-Stockholm des Städtischen Elektrizitätswerkes Stockholm (nach einem Vorschlag von Ingenieur Laurell) verwendet wurde[1]).

Als Armaturen dienen bei diesen Isolatoren eine meist aus verzinktem Temperguß (seltener aus Schmiedeeisen) bestehende Kappe und ein schmiedeeiserner Klöppel. Die Vereinigung der einzelnen Glieder zu Ketten ist bei den Kappenisolatoren außerordentlich einfach. Die in Deutschland üblichste Vereinigungsart ist die mittels Kugelpfanne und Kugelklöppel, die eine allseitig bewegliche Vereinigung gewährleistet, und von vornherein Biegungsbeanspruchungen in der Isolatorenkette ausschließt.

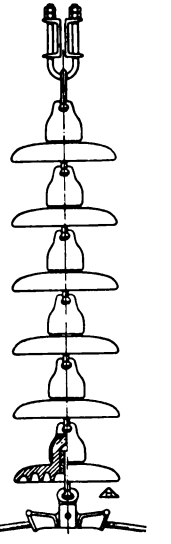


Abb. 49. 6gliedrige Kappenisolatorenkette für 110 kV.-Betriebsspannung

Die Vereinigung der Armaturteile mit dem Porzellan erfolgt entweder mittels Kittes oder auf kittlose Weise. Gegen das Aufkitten der eisernen Kappe, das auch bei anderen Isolatorformen, wie z. B. bei Innenraumstützenisolatoren seit langem üblich und bewährt ist, dürften kaum Bedenken bestehen. Dagegen sind gegen die Innenkittung des Klöppels wiederholt große Bedenken erhoben worden. Tatsächlich liegen die Verhältnisse bei gekitteten Hängeisolatoren auch noch ungünstiger als bei gekitteten Stützenisolatoren. Denn während bei diesen nur Porzellan und Kitt mit ihrer verschiedenen Wärmedehnung in Frage kamen, sind es hier drei

[1]) Teknisk Tidskrift, Elektrot. 1920, S. 105.

Digitized by Google

verschiedene Stoffe, nämlich Eisen, Porzellan und Zement, die einen stark verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten besitzen[1]). Was das Porzellan und den Kitt betrifft, so kann man sich ähnlich wie bei den Stützenisolatoren gegen schädliche Spannungen schützen, indem man einen Zementkitt verwendet, der annähernd die gleiche Wärmedehnung wie Porzellan besitzt. Um auch der starken Ausdehnung des Eisens Rechnung zu tragen, hat man mit Erfolg die mit dem Kitt in Berührung kommenden Eisenflächen mit einem nachgiebigen Schutzanstrich versehen, der gewissermaßen als Ausgleichspuffer zwischen Eisen und Zement dient. Allerdings kann man von einem derart nachgiebig gekitteten Isolator nicht ganz die gleiche Festigkeit, wie von einem starr verkitteten Isolator verlangen; indessen sind ohne Zweifel bisher in bezug

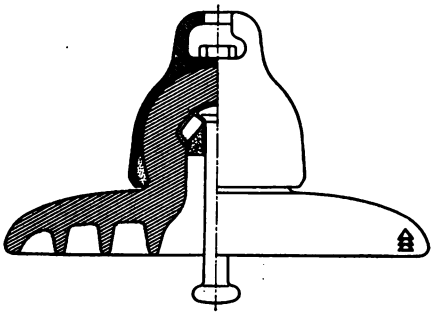


Abb. 50. V-Hängeisolator.

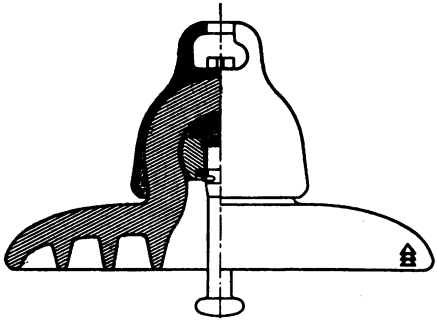


Abb. 51. Kugelkopfhängeisolator.

auf mechanische Festigkeit z. T. übertrieben hohe Anforderungen an Hängeisolatoren gestellt worden. Tatsächlich ist wohl kaum ein Fall bekannt, daß ein Isolator, der elektrisch einwandfrei war, nur infolge ungenügender Zerreißfestigkeit im Betrieb versagt hätte.

Gelegentlich sind die mit dem Zement in Berührung kommenden Porzellankittflächen mit einem leitenden Anstrich oder sogar einem metallischen Überzug[2]) versehen und diese mit den eingekitteten Armaturteilen leitend verbunden worden, so daß der Zement kurz geschlossen war. Es mag dahingestellt bleiben, ob diese Maßnahme zweckentsprechend und notwendig ist, zumal die hierfür gemachten Voraussetzungen sicher nicht als erwiesen gelten können[3]).

Mit der Verbesserung gekitteter Kappenisolatoren haben auch die sogenannten kittlosen Kappenisolatoren wesentlich an Bedeutung verloren. Von diesen sind in den letzten Jahren, seitdem man darüber Klarheit gewonnen hatte, daß die Sprünge an Kappenisolatoren wohl

[1]) Montelins, Teknisk Tidskrift, Elektr. 1914, S. 92; Brundige, Transact. AIEE. 1917, S. 535; Fritz-Gilchrest, Transact. AIEE. 1921, S. 1127.

[2]) Laurell, Teknisk Tidskrift, Elektrot. 1915, S. 33.

[3]) Borgquist, ebd. 1922, S. 7; ETZ. 1922, S. 1379.

Digitized by Google

ausschließlich auf die Verwendung ungeeigneten Kittes zurückzuführen waren, eine überaus große Zahl der verschiedensten Konstruktionen erdacht worden. Von diesen seien hier nur der Sprungringisolator sowie der Kegelkopfisolator erwähnt[1]). Allerdings hat sich bisher keine der vielen kittlosen Konstruktionen in größerem Umfange einführen können. Der Grund hierfür ist der, daß fast sämtliche Konstruktionen letzten Endes auf eine mehr oder weniger unmittelbare Kräfteübertragung zwischen Porzellan und Eisen hinauslaufen. Da es jedoch fabrikationstechnisch völlig ausgeschlossen ist, eine überall gleichmäßige Auflage zwischen den beiden Stoffen zu erreichen, so findet in der Regel eine Überbeanspruchung einzelner Porzellanteile statt, was den frühzeitigen Bruch des ganzen Isolators zur Folge hat, wenn nicht ein druckausgleichendes Zwischenmittel, wie z. B. ein Bleieinguß vorhanden ist. Dieser ist beispielsweise bei den sogenannten V-Isolatoren[2]) (Abb. 50) neben den für die Kraftübertragung bestimmten Metallklötzchen für deren Lagesicherung vorgesehen.

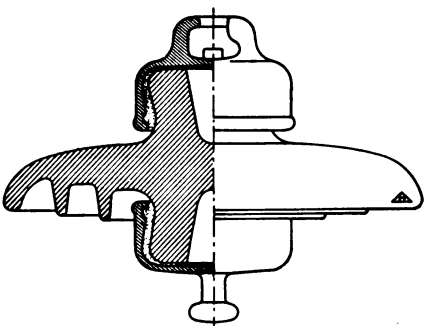


Abb. 52. Doppelkappenhängeisolator.

Diese Metallklötzchen werden zunächst, während sie in aufrechtstehender Lage mit einer beliebigen Hilfsvorrichtung rings um den Klöppel angeordnet sind, zusammen mit diesem in den Isolator eingeführt und dann mittels eines besonderen Hilfswerkzeuges innerhalb der Isolatorhöhlung auseinandergespreizt, so daß sie die in Abb. 50 bezeichnete Lage einnehmen. Zum besseren Druckausgleich zwischen Druckkörper und Porzellan wird der innere Hohlraum des Isolators zuvor mit einer passenden geteilten Pappmanschette ausgekleidet.

Eine andere in einer großen Zahl bereits eingebauter Isolatoren bewährte Befestigungsweise des Klöppels zeigt der sogenannte Kugelkopfisolator[3]), der seinen Namen von einer im Porzellan eingebrannten Porzellankugel erhalten hat (Abb. 51). Der Einbau des Klöppels erfolgt dabei in der Weise, daß zunächst durch entsprechende Verdrehung der lose eingebrannten Porzellankugel die Eisenmutter eingebracht, dann der Klöppel eingeschraubt, und endlich auf geeignete Weise gegen Herausdrehen gesichert wird. Zur besseren Lagerung der Kugel wird schließlich noch der Hohlraum zwischen Isolator und innerer Porzellankugel mit einem passenden Füllstoff, als welcher auch Blei dienen kann, ausgegossen.

[1]) Altmann, Dr., Der elektr. Betrieb, 1923, S. 187. — [2]) Vaupel, ETZ. 1923; S. 59. — [3]) Scheid, ETZ. 1921, S. 1323.

Digitized by Google

Die mit derart (nach Abb. 50 u. 51) montierten Isolatoren erzielten Festigkeitswerte sind außerordentlich hoch und erreichen vielfach die Festigkeitsgrenze des einmontierten Klöppels (etwa 7000 kg).

Die dritte grundsätzliche Bauart von Hängeisolatoren sind die Doppelkappenisolatoren (Abb. 52). Sie besitzen überhaupt keine Klöppel, sondern nur je eine von oben und unten übergreifende Kappe oder sonstige Armierung. Es ist also bei diesen Isolatoren jede Innenkittung vermieden, die Kappe kann entweder außen aufgekittet, aufgebleit oder auf sonstige kittlose Weise befestigt werden. Das Hauptbedenken, das gegen diese Isolatoren erhoben werden könnte, ist das, daß sie nicht bruchsicher sind. Allerdings wird bei ihnen das Porzellan nur auf Zug beansprucht. Indessen war schon auf Seite 124 darauf hingewiesen, daß die Zugfestigkeit von Porzellan immerhin verhältnismäßig recht hoch ist. Tatsächlich besitzen derartige Isolatoren eine vollauf ausreichende Zugfestigkeit und das Bedenken, daß der Isolator durch Steinwürfe bis zum vollkommenen Bruch zertrümmert werden könnte, hat sich im praktischen Betrieb als grundlos erwiesen. Es bleibt das Bedenken der zu großen Wandstärke, die jedoch leicht durch entsprechende Kopfaussparungen vermieden werden kann.

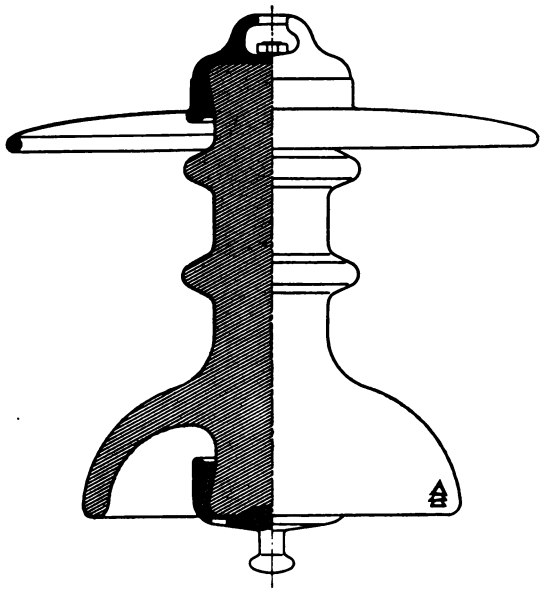


Abb. 53. Doppelkappenisolator längerer Ausführung, sogenannte Motortype.

Als besondere Form des Doppelkappenisolators mag noch der Isolator „Type Motor, Baden“[1]) (Abb. 53) erwähnt werden, bei dem der auf Zug beanspruchte Porzellanteil, um die für höhere Betriebsspannung erforderliche größere Zahl von Einzelgliedern zu beschränken, bedeutend länger ausgebildet ist, und bei dem die Porzellanmäntel teilweise durch Metalldächer ersetzt sind. (Vgl. hierzu auch S. 150.)

In bezug auf elektrisches Verhalten haben die Schlingenisola-

[1]) Schumann, Ing.Zeitschr. 1923, S. 202; Benischke, ETZ. 1923, S. 820.

Digitized by Google

toren mit Rücksicht auf die durch die kettengliedartige Anordnung der Armaturen bedingten ungünstigen elektrischen Feldverhältnisse und wegen ihrer ungleichen Masseverteilung, sowie schwierigeren Herstellungsweise, auf dem Prüfstand im allgemeinen, eine verhältnismäßig geringe Durchschlagsfestigkeit.

Immerhin haben sich im Betriebe nach dieser Richtung wohl nie Beanstandungen ergeben.

Die Kappenisolatoren besitzen im Gegensatz hierzu infolge ihrer symmetrischen Form und gleichmäßigen Wandstärke von vornherein eine Durchschlagsfestigkeit, die weit über der Trockenüberschlagsspannung liegt.

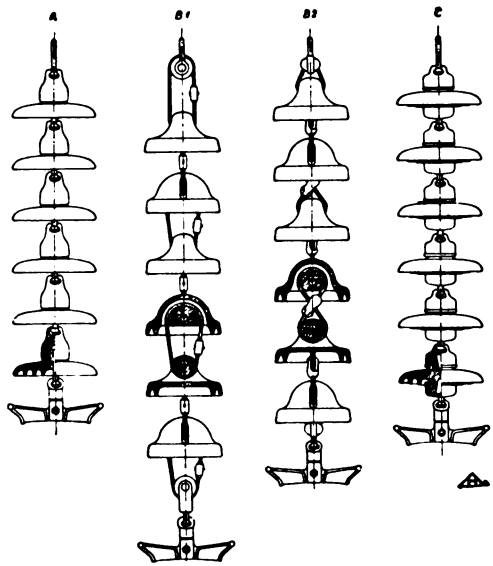


Abb. 54. Gegenüberstellung der wichtigsten Ausführungsarten von Hängeisolatoren. (A = Kappenisolator, B_1 = Schlingenisolator mit parallelen Seilen, B_2 = Schlingenisolator mit gekreuzten Seilen und verkürzten Endarmaturen, C = Doppelkappenisolator.)

Noch günstiger liegen in dieser Beziehung die Verhältnisse bei Doppelkappenisolatoren, namentlich wenn sie eine größere Länge als nach Abb. 52 besitzen, was jedoch in mechanischer Beziehung weniger zu empfehlen sein dürfte.

Viel weniger als hinsichtlich der Durchschlagsfestigkeit unterscheiden sich die einzelnen Isolatorformen in bezug auf Überschlagsspannung. Um dies zu veranschaulichen, sind in Abb. 54 je eine Kette der drei Hauptformen von Hängeisolatoren nebeneinander gezeichnet. Die Schlingenisolatoren sind dabei einmal mit parallelen, das andere Mal mit gekreuzten Seilschlingen dargestellt. Auch ist in beiden Fällen die Auf-

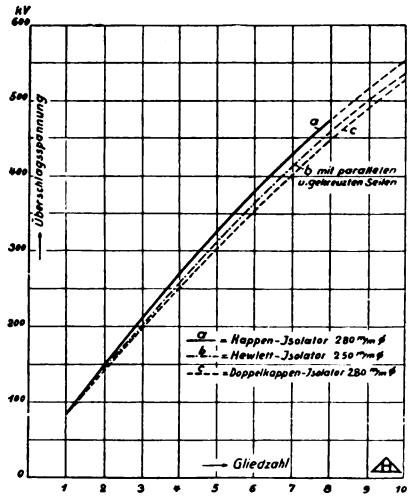


Abb. 55. Trockenüberschlagsspannung verschiedener Hängeisolatorenketten.

Digitized by Google

hängung am Mast und die Verbindung mit der Leitungsklemme verschieden gewählt.

Für die Überschlagsspannung der Ketten kommt es nun wesentlich auf den Abstand der einzelnen Glieder voneinander an, weil bei geringem Abstand der Überschlag unmittelbar vom Aufhängepunkt der Kette nach der Leitungsklemme, dagegen bei größerem Abstand kas-

Abb. 56. Lichtbogenüberschlag an einer Kappenisolatorenkette bei Regen.

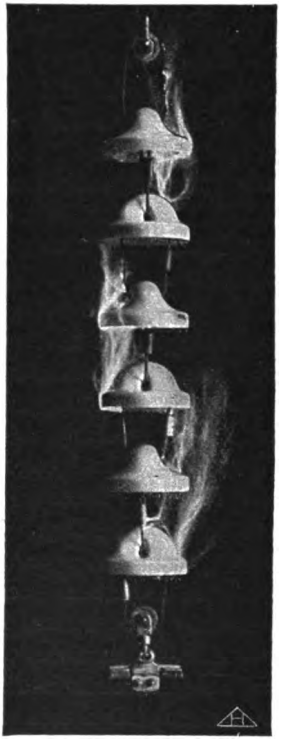


Abb. 57. Lichtbogenüberschlag an einer Schlingenisolatorenkette bei Regen.

kadenartig von Glied zu Glied erfolgt. Im trocknen Zustand tritt fast stets das erstere ein. Infolgedessen ist die Trockenüberschlagsspannung einer Hängekette fast ganz unabhängig von der Form des Isolators (Abb. 55).

Anders bei Regen. Hier ist der Kappenisolator mit seiner kurzen Baulänge dem Schlingenisolator unbedingt überlegen, da bei dem letzteren die Entladungen fast nie außen um die ganze Kette, sondern infolge des kürzeren Überschlagsweges meist vom Rande des auf der Oberseite nassen Isolators nach dem Drahtseil erfolgen. Einige Abbildungen

Digitized by Google

mögen dies näher veranschaulichen: Abb. 56 zeigt eine Kette von Kappenisolatoren bei Regen. Der Überschlag erfolgt entweder unmittelbar außen um die Kette, oder der sich ursprünglich an den feuchten Isolatormänteln bildende Lichtbogen breitet sich doch in Kürze nach außen aus. Bei Schlingenisolatoren hingegen bleibt der Lichtbogen, wenigstens bei dem zu Laboratoriumsversuchen meist benutzten, ziemlich gut leitenden Hochdruckleitungswasser, im allgemeinen an den einzelnen Isolatorgliedern haften (Abb. 57) und die Regenüberschlagsspannung liegt infolgedessen auch wesentlich niedriger als bei Kappenisolatoren. Allerdings kann die Regenüberschlagsspannung durch Kreuzen der Seile etwas erhöht werden. Denn in diesem Falle wird der für die Regenüberschlagsspannung allein maßgebende Abstand vom Rande des Porzellantellers nach dem Drahtseil (die nutzbare Schlagweite) verlängert und entsprechend die Überschlagsspannung in die Höhe gesetzt[1]).

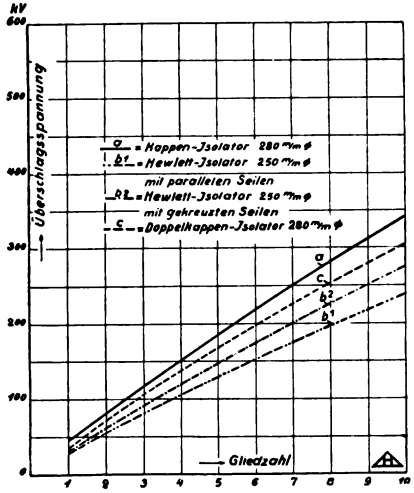


Abb. 58. Regenüberschlagsspannung verschiedener Hängeisolatorenketten.

Quantitativ sind diese Verhältnisse in Abb. 58 zusammengestellt. Auf die starke Erhöhung der Regenüberschlagsspannung infolge Kreuzung der Seile (etwa 15 % Zunahme) sei ausdrücklich hingewiesen. Dabei ist besonders bemerkenswert, daß diese Erhöhung nur für die Regenüberschlagsspannung, dagegen nicht für die Trockenüberschlagsspannung gilt, da für die letztere hauptsächlich der Abstand je eines Seilpaares maßgebend ist und dieser durch die Kreuzung kaum beeinflußt wird.

Für Abspannisolatoren besteht hinsichtlich der Regenüberschlagsspannung zwischen den einzelnen Isolatorformen ein weit geringerer Unterschied als bei Hängeisolatoren. Denn bei Abspannisolatoren werden bei Regen doch alle Flächen mehr oder weniger naß. Die bei Abspannisolatoren ziemlich frühzeitig einsetzenden Vorentladungen können nur bei einer Isolatorform vermieden werden, die auch bei Regen unbedingt trockenbleibende Flächen bietet. Dies ist bei dem oben erwähnten Schäkel-Isolator der Fall (Abb. 42). Die Konstruktion dieses Isolators bietet weiter die Möglichkeit, den gegenseitigen Ab-

[1]) ETZ. 1922, S. 564.

Digitized by Google

stand der Isolatoren so gering zu wählen, daß Entladungen mit Sicherheit zwischen den Metallarmaturen und nicht über die Porzellanfläche erfolgen [1]). Der Isolator bietet dann ganz ähnliche Verhältnisse, wie auf S. 139 für Stützenisolatoren mit Metallschutzringen geschildert und hat zudem den Vorzug vollkommener Bruchsicherheit.

Auch bei Hängeisolatoren hat man mit Erfolg versucht, durch Anbringung einer besonderen Sicherheitsfunkenstrecke die Trockenüberschlagsspannung herunterzusetzen

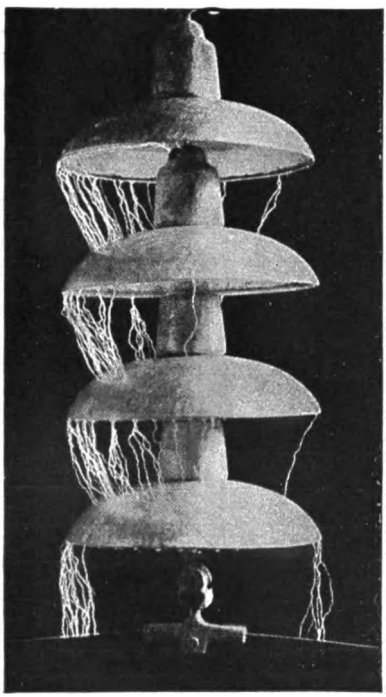


Abb. 59. Überschlag an einer Kette von Metallschirmhängeisolatoren.

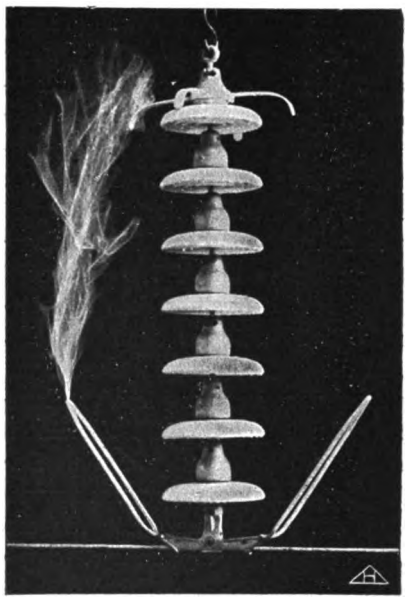


Abb. 60. Hängeisolatorenkette mit Lichtbogenschutzhörnern.

und sie der Regenüberschlagsspannung anzunähern. Auf einfachste Weise ist dies bei den Metallschirmisolatoren der Fall (Abb. 59). Hier sind die Porzellanteile vollkommen von den Metallschirmen verdeckt und somit sowohl gegen Benetzung durch Regen, als auch gegen die zerstörende Wirkung eines Lichtbogens geschützt. Selbstverständlich können an Stelle der geschlossenen Metallschirme auch offene Metallringe und dergleichen treten. Im allgemeinen beschränkt man sich indessen darauf, solche Schutzvorrichtungen am oberen und unteren Ende der Kette anzubringen (Abb. 60).

Der Abstand derartiger Schutzhörner kann bei Kappenisolatoren

[1]) Weicker, ETZ. 1913, S. 1485, ETZ. 1921, S. 1477.

Digitized by Google

leicht so weit genähert werden, daß Überschläge auch bei Regen mit Sicherheit zwischen den Hörnern und nicht längs der Isolatorkette auftreten.

Bei Schlingenisolatoren ist dies im allgemeinen weniger leicht möglich, da hier die Regenüberschlagsspannung, wenigstens bei Beregnung durch Leitungswasser mit verhältnismäßig hoher Leitfähigkeit, wesentlich tiefer als bei Kappenisolatoren liegt.

Indessen muß es überhaupt als fraglich bezeichnet werden, ob derartige Schutzmaßnahmen unbedingt nötig sind. Bei den in Deutschland teilweise schon seit einer Reihe von Jahren ohne diese Vorrichtungen arbeitenden Hängeisolatorenanlagen haben sich jedenfalls in dieser Beziehung kaum Beanstandungen gezeigt. Auch in Amerika, wo diese Hörner schon seit langem zum Schutz der Isolatoren gegen Lichtbogeneinwirkung und Erhöhung des Durchschlagssicherheitsgrades empfohlen waren, ist ihr Gebrauch durchaus nicht allgemein.

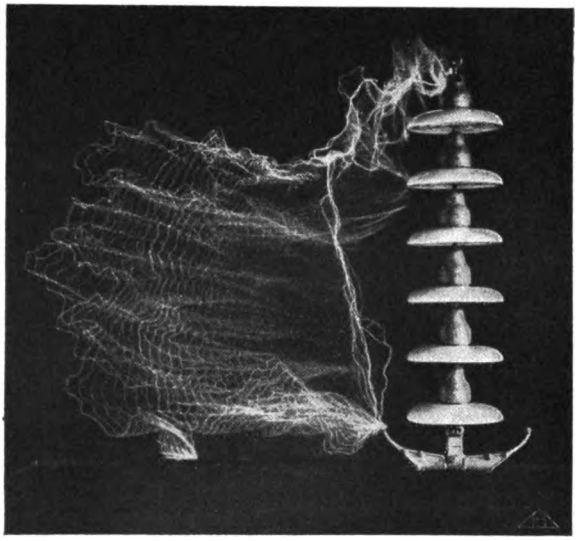


Abb. 61. Abtreiben eines Lichtbogens bei seitlichem Wind.

Übrigens wird mit Recht häufig weniger Wert auf den Schutz der Isolatoren als auf den der Leitung gelegt, um diese gegen Verbrennen durch den Lichtbogen zu schützen. Denn bei seitlichem Wind kann, wie Abb. 61 zeigen mag, ein Lichtbogen ziemlich weit von der Kette weggetrieben werden, bevor er abreißt. Die Hörner müssen also so ausgebildet werden, daß sie mit Sicherheit den Übergang des Lichtbogens auf die Leitung verhindern. Dies kann nur bei ziemlich weiter Ausladung erreicht werden, wie dies beispielsweise Abb. 62 veranschaulicht. Diese Konstruktion ist in der seit einigen Jahren in Betrieb befindlichen, von dem Städtischen E.W. Stockholm erbauten Anlage Untra-Stockholm mit bestem Erfolg angewandt, und zwar sowohl für Hänge- als auch für Abspannisolatoren[1]). Wichtig ist, daß mit derartigen

[1]) Laurell, Teknisk Tidskrift, Elektrot. 1920. Heft 7 und 9.

Digitized by Google

Hörnern zugleich eine wesentliche Verbesserung der Spannungsverteilung längs der Isolatorenkette erreicht wird.

Es ist eine bekannte[1]) Erscheinung, daß sich die Spannung nicht gleichmäßig auf die einzelnen Glieder einer mehrgliedrigen Hängeisolatorkette verteilt, sondern auf die untersten, besonders auf das der Leitung am nächsten liegende Glied ein ungleich höherer Spannungsanteil als auf die oberen Glieder entfällt.

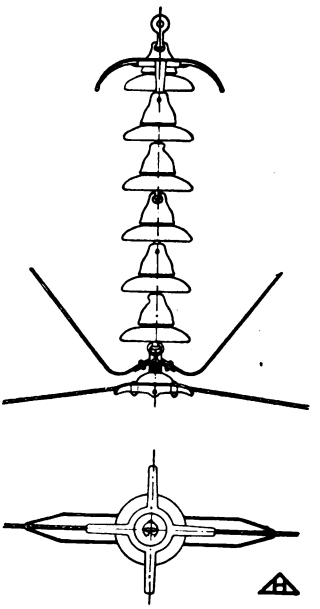


Abb. 62. Durch lange Schutzhörner abgeschirmte Hängeisolatorenkette.

Quantitativ sind diese Verhältnisse für eine verschieden gliedrige Kappenisolatorenkette in Abb. 63 wiedergegeben. Als Ordinaten sind dabei die gemessenen Spannungsanteile jedes Gliedes aufgetragen, ausgedrückt in Prozenten der Sollspannung, d. h. derjenigen Spannung, die jedes Glied erhalten sollte, wenn sich die Spannung gleichmäßig verteilen würde. In Abb. 64 sind die am meisten interessierenden Spannungsanteile des untersten Gliedes für verschiedene Gliedzahlen und die verschiedenen Isolatorarten zusammengestellt. Allerdings hängen diese Werte ganz erheblich von der Art der Messung, von der Höhe der Spannung und von der Versuchsanordnung ab. Jedenfalls ergibt sich aber, daß mit zunehmender Gliedzahl der prozentuale Spannungsanteil des untersten Gliedes kaum noch abnimmt, eine Erhöhung der Gliedzahl also in dieser Beziehung keine Entlastung des jeweils untersten Gliedes bedeutet.

Um nun eine gleichmäßigere Spannungsverteilung auf die Einzelglieder einer Hängekette zu erzwingen, besteht die Möglichkeit, die Kapazität der Einzelglieder verschieden zu wählen, diese also abzustufen. Als Mittel einer derartigen Kapazitätsabstufung ergeben sich u. a. die folgenden:

1. Änderung der Kopfwandstärke des Isolators.
2. Verschiedene Kopfhöhe bei gleicher Wandstärke.

---

[1]) Vgl. z. B. Peek, Transact. AIEE. 1912, S. 907; Rüdenberg, ETZ. 1914, S. 412; Borgquist-Centervall, Teknisk Tidskrift El. 1915, Heft 4 und 5; Petersen, ETZ. 1916, S. 4; Estorff, ETZ. 1918, S. 62; Schwaiger, E. u. M. 1919, S. 569; Fontvieille, Rev. Gen. d'El., 1921, S. 519; Viel, Rev. Gen. d'El. 1922, S. 273 und 801; Prinetti, L'Elettrotecnica 1922, S. 584; Ryan-Henline, Transact. AIEE. 1920, S. 1669; Peek, Transact. 1920, S. 1685; Baum, Transact. AIEE. 1921, S. 1017.

Digitized by Google

3. Verschieden weit reichende Verlängerung eines metallischen Belags auf dem Porzellanmantel außerhalb des Kopfes[1]).

4. Anordnung besonderer, evtl. verschieden großer Metallscheiben zwischen den einzelnen Isolatorgliedern oder Gruppen von Isolatoren bzw. oberhalb und unterhalb der ganzen Kette.

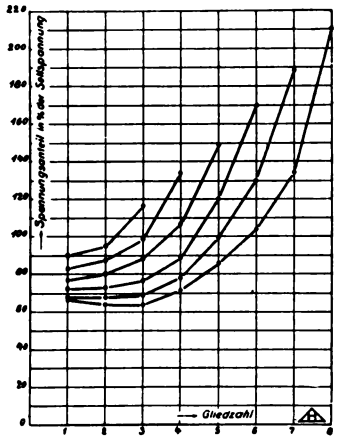


Abb. 63. Spannungsverteilung an Ketten von Kappenisolatoren verschiedener Gliedzahl.

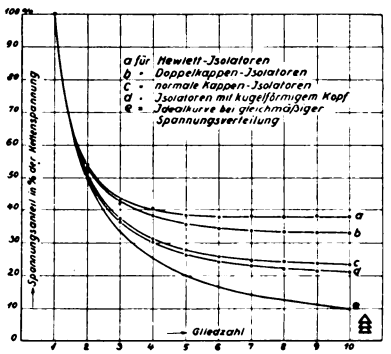

a für Hewlett-Isolatoren
b " Doppelkappen-Isolatoren
c " normale Kappen-Isolatoren
d " Isolatoren mit kugelförmigem Kopf
e " Idealkurve bei gleichmäßiger Spannungsverteilung
Spannungsanteil in % der Kettenspannung
Gliedzahl

Abb. 64. Spannungsanteil des untersten Gliedes von Hängeisolatorenketten verschiedener Gliedzahl.

5. Anordnung besonderer Schutzringe oder -hörner am oberen und unteren Ende der Kette, außerhalb der Isolatoren. Die letztere Anordnung gewährt, wie schon besprochen, zugleich eine Sicherheitsfunkenstrecke bei unzulässigen Spannungserhöhungen.

Mit allen der genannten Mittel kann man die Spannungsverteilung stark beeinflussen; dabei ist es durchaus nicht nötig, nun eine vollkommen gleichmäßige Spannungsverteilung auf allen Gliedern zu erzwingen, vielmehr begnügt man sich in der Regel damit, eine Entlastung des untersten Gliedes herbeizuführen. Beispielsweise wird man bei einer Kapazitätsänderung durch verschieden starke Wandstärken höchstens eine Unterteilung in drei Gruppen vornehmen, so daß beispielsweise bei

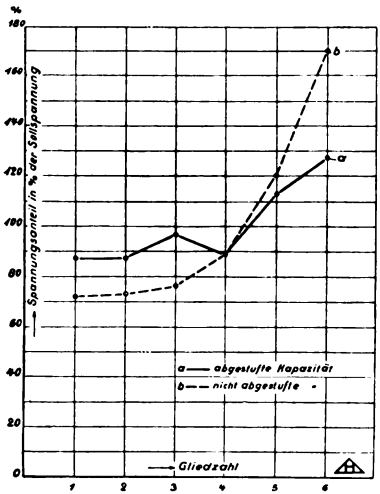


Abb. 65. Spannungsverteilung an Hängeketten abgestufter und nicht abgestufter Kapazität.

[1]) Marvin, Transact. AIEE. 1916, S. 745.

Digitized by Google

einer sechsgliedrigen Kette ein Isolator größter Kapazität, zwei Isolatoren mittlerer Kapazität und drei Isolatoren geringster Kapazität zu einer Kette vereinigt werden. Die hiermit erzielte Wirkung mag Abb. 65 veranschaulichen; vergleichsweise ist nochmals eine nicht abgestufte Kette gegenübergestellt.

Die Hauptfrage ist nur die, ob eine derartige Spannungsbeeinflussung überhaupt nötig und ob sie zweckmäßig ist[1]). Hierüber sind die Ansichten sehr geteilt. Denn auch gegen die Abstufung sprechen erhebliche Gründe. Wird die Abstufung durch verschiedene Ausführung der Isolatorenglieder erreicht, so ist die Lagerhaltung verschiedener Typen und ihre etwaige Auswechselung lästig, zumal wenn sich dieselben äußerlich kaum unterscheiden. Doch auch vom Standpunkt der Betriebssicherheit erscheint eine derartige Abstufung kaum erforderlich. Wenigstens haben statistische Feststellungen nicht ergeben, daß das elektrisch am stärksten beanspruchte unterste Glied einer Kette immer am häufigsten versagt[2]). Auch bieten vergleichende Überschlagsversuche an abgestuften und nicht abgestuften Ketten das überraschende Bild, daß die Überschlagsspannung einer nicht abgestuften Kette genau so hoch wie die einer nicht abgestuften Kette ist. Dies erklärt sich wohl aus der Tatsache, daß kurz vor dem Überschlag infolge Einsetzens von Glimmentladungen eine selbsttätige Vergrößerung der Eigenkapazität der am stärksten beanspruchten Isolatoren und damit ein wirksamer Spannungsausgleich stattfindet.

Es ist also ganz falsch etwa anzunehmen, daß mit zunehmender Gliedzahl die Kettenüberschlagsspannung nicht mehr zunehme. Neuere Versuche von Peek mit Spannungen bis 1000 kV. haben sogar ergeben, daß bis zu den höchsten Gliedzahlen und Spannungen die Überschlagsspannung genau linear mit der Gliedzahl zunimmt[3]).

Mit Recht hat man daher in Deutschland, wo die höchste Betriebsspannung zurzeit 110000 Volt beträgt, im allgemeinen von einer Kapazitätsabstufung ganz abgesehen; dagegen erscheint eine Entlastung der untersten Glieder durch besondere, zugleich als Lichtbogenschutz dienende Hörner durchaus angebracht. Notwendig dürfte die Anwendung derartiger Mittel bei Betriebsspannungen über 150 kV. werden. Denn da nach Abb. 64 der prozentuale Spannungsanteil des untersten Gliedes einer Kette schon von etwa 7 bis 8 Gliedern an nahezu konstant wird, und zwar je nach der Isolatortype etwa 25 bis 35% der Kettenspannung beträgt, so würde bei einer Kettenspannung von 200 kV. doch bereits ungünstigsten Falles mehr als 60000 Volt auf ein Glied entfallen, ein Spannungswert, der bereits die Regenüberschlagsspannung

[1]) Borgquist, Teknisk Tidskrift El. 1922, S. 7; ETZ. 1922, S. 1329; Mitt. VEW. Nr. 342, S. 268. — [2]) Panton, Transact. AIEE. 1922, S. 740. — [3]) El. World. 1921, S. 1319.

Digitized by Google

eines einzelnen Gliedes übersteigt. Man müßte also entweder größere Isolatorglieder, d. h. solche mit höherer Überschlagsspannung bei eventuell etwas geringerer Gesamtzahl wählen, oder doch die Spannungsverteilung durch besondere Mittel gleichförmiger gestalten. Hierfür aber ist das bereits vorher genannte Mittel der Abschirmung eventuell verbunden mit Sicherheitsfunkenschutz, wohl das einfachste Verfahren.

B. Glas.

Was ist Glas? Glas[1]) im allgemeinsten Sinne des Wortes ist ein aus seinem Schmelzfluß durchweg amorph erstarrter Stoff. Durch diese allgemeine Begriffsbestimmung kann man vielleicht am besten das von den Tonwaren, insbesondere gewissen, dem Glas ähnlichen Porzellansorten grundsätzlich abweichende Wesen des Glases kennzeichnen: bei den betreffenden Porzellansorten eine Mischung und Formung der verschiedenen Rohstoffe zum fertigen Körper in kaltem Zustande und nachträgliche Erhitzung bis zum Scharfbrennen (Sintern) der Stücke; bei Glas ein Zusammenschmelzen der einzelnen Bestandteile zu einem besonderen Fluß und ein Gestalten der zu formenden Gegenstände aus diesem weichen Fluß, der erst beim Erstarren fest wird. Hierin liegt schon äußerlich ein grundsätzlicher Unterschied zwischen Porzellan und Glas als keramischen Isolierstoffen.

Seiner Zusammensetzung nach besteht das Glas aus: Quarzsand (also Kieselsäure), Kalk und Natron- oder Kalisalzen, wie Glaubersalz, Soda, Pottasche.

Entsprechend ihrer Zusammensetzung sind die Glassorten je nach ihrem Verwendungszweck außerordentlich verschieden. Im Mittel kann für technische Gläser ein Anteil von 70 bis 80% Kieselsäure und annähernd je gleicher Mengen von Kalk und Alkalien als normal gelten. Außerdem enthalten besondere Glassorten, wie z. B. die Flintgläser, ziemlich große Mengen von Blei.

Zur Herstellung des Glases werden die Bestandteile, also Sand, Kalk und Soda oder Pottasche, sowie die sonstigen zur Erreichung besonderer Eigenschaften erforderlichen Zusätze, innig gemischt und der so gewonnene „Satz“ bei einer Temperatur von etwa 1300 bis 1400° geschmolzen. Unter den Schmelzöfen unterscheidet man Hafenöfen und Wannenöfen, letztere wieder mit und ohne Generatorgasfeuerung.

Die Hafenöfen oder Preßöfen zeichnen sich dadurch aus, daß das Glasgemenge in besonders geformte, aus Ton bestehende Tröge, „Hafen“ genannt, eingelegt und dort geschmolzen wird. Bei den Wannenöfen ist dagegen nur ein einziger, großer Glasbehälter vorhanden. In einem solchen Ofen kann daher nur eine einzige bestimmte

[1]) Dralle, Glasfabrikation (Oldenburg 1911); Zschimmer, Die Glasindustrie in Jena (Diedrichs 1909).

Digitized by Google

Glassorte, in einem Hafenofen dagegen können verschiedene Glassorten gleichzeitig geschmolzen werden.

Mit Rücksicht auf größere Wirtschaftlichkeit und bessere Ausnützung des Brennmaterials sind vorzugsweise Brennöfen mit Regenerativfeuerung in Gebrauch. Der Betrieb selbst ist in der Regel ein dauernder. Während des Ofenbetriebs, der etwa $^3/_4$ Jahr, solange die Ofenmauerung standhält, dauert, wird immer neues Glasgemenge in die Schmelzzone der Wanne eingelegt, während das geschmolzene Glas in der etwas kühleren Arbeitszone, wo das Glas schon mehr sirupartige Beschaffenheit besitzt, durch die Arbeitslöcher der Wanne entnommen wird. Die Verarbeitung des Glases ist je nach dem Verwendungszweck recht verschieden. Die gebräuchlichste Verarbeitungsweise ist die, daß das Glas mittels eines eisernen Blasrohres, der sogenannten Pfeife, durch die Arbeitslöcher der Wanne entnommen wird und nun, eventuell nach wiederholtem Anwärmen, in eiserne Formen, z. B. die einer Flasche, eines Zylinders usw. hineingeblasen wird. Glasrohre entstehen beispielsweise in einfachster Weise dadurch, daß ein derartiger Glaszylinder in noch glühendem Zustande durch zwei voneinander weglaufende Arbeiter in die Länge gezogen wird, wobei der eine ständig Luft durch das Blasrohr in den Glaszylinder einbläst.

Zur Herstellung von Tafelglas, das bei Besprechung der elektrischen Isoliermittel namentlich für den Kondensatorenbau am meisten interessiert, wird das Glas ebenfalls mit der Pfeife entnommen und zunächst in die Form einer größeren Kugel geblasen, die durch weitere Behandlung in eine Walze übergeführt wird. Endlich wird die Walze der Länge nach aufgeschnitten, in einem Streckofen aufgerollt und glatt gestreckt.

Da rasche Abkühlung eine übergroße Sprödigkeit bedingen würde, so ist es von besonderer Wichtigkeit, daß der noch glühende Glaskörper in besonderen Kühlöfen ganz langsam abgekühlt wird. Dies geschieht in der Weise, daß das Glas auf fahrbaren Wagen langsam durch die verschiedenen Wärmezonen eines langgestreckten Kühlofens hindurchgefahren wird.

Eigenschaften.

Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften[1]) des Glases sind kurz zusammengefaßt die folgenden:

1. Durchgangswiderstand:
   Wie bei Porzellan stark abhängig von der Temperatur sowie von der Zusammensetzung des Glases. Größenordnung etwa $3 \cdot 10^{14}$ Ohmcm[2]) bzw. $0{,}5 \cdot 10^{8}$ bis $80 \cdot 10^{14}$ Ohmcm[3]).

[1]) Hovestadt, Jenaer Glas (Fischer 1900). — [2]) Landolt-Börnstein, Phys. Chem. Tabellen. — [3]) Curtis, Scientific papers of the Bureau of Standards. Nr. 234. S. 419.

Digitized by Google

2. Durchschlagsfestigkeit:
Angaben außerordentlich verschieden. Größenordnung etwa 100 bis 500 kV/cm.
3. Dielektrizitätskonstante:
Diese ist je nach der Zusammensetzung außerordentlichen Schwankungen unterworfen. Das für elektrische Zwecke besonders interessierende, weil für Glaskondensatoren benutzte Minosglas der Firma Schott & Genossen, Jena, hat eine Dielektrizitätskonstante [1]) von 7,5, während gewöhnliches Fensterglas etwa einen Wert von 5 bis 6 besitzt. Der höchste gemessene Wert [2]) ist 17.
4. Dielektrische Verluste [1]):
Auch diese sind je nach Zusammensetzung den größten Schwankungen unterworfen. Das eben erwähnte Minosglas hat einen von der Frequenz nahezu unabhängigen Verlustwinkel von 2 Minuten, ist also praktisch verlustfrei.
5. Spezifisches Gewicht [3, 4]):
Für gewöhnliche Gläser schwankend zwischen 2 und 3, mit steigendem Gehalt an Schwermetallen bis zu 6, für Minosglas etwa 3,6.
6. Elastizitätsmodul:
Im Mittel etwa 500000 bis 790000 kg/cm^2.
7. Druckfestigkeit [5]):
Etwa 6000 bis 13000 kg/cm^2, gemessen an Würfeln von 6 mm Kantenlänge.
8. Zugfestigkeit [5]):
Etwa 300 bis 900 kg/cm^2 nach Versuchen von Winkelmann u. Schott.
9. Härte:
4,5 bis 6,5 nach der Auerbachschen Härteskala.
10. Ausdehnungskoeffizient:
Dieser läßt sich durch verschiedene Zusammensetzung fast beliebig bis zu demjenigen von geschmolzenem Quarzglas herunterdrücken, doch sind derartige Gläser dann schwierig herstellbar und technisch nicht mehr verwendbar.

Praktisch verwertbare Zahlen sind etwa 3 bis $10 \cdot 10^{-7}$ für den linearen Ausdehnungskoeffizienten.

---

[1]) Schott, E., Diss. Jena; Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph. 1921. Bd. 18, Heft 2.

[2]) Jäger, R., Diss. Berlin. 1917; Ann. d. Physik 1917. Bd. 53, S. 409.

[3]) Winkelmann u. Schott, O., Ann. d. Physik 1894. Bd. 51, S. 730.

[4]) Saillie, W. L., Journ. of the Soc. chem. Industry 1921. Bd. 40, S. 141.

[5]) Winkelmann u. Schott, O., Ann. d. Physik 1894. Bd. 51, S. 697; 1897. Bd. 61, S. 105.

Digitized by Google

11. Temperaturbeständigkeit:
Ein bestimmter Schmelzpunkt ist nicht angebbar, da ein allmähliches Erweichen eintritt. In bezug auf Lichtbogenbeständigkeit ist dagegen von viel größerer Bedeutung die große Sprödigkeit des Glases, die lange vor dem Schmelzen des Glases zu einem Springen des Isolators führt.

Verwendung.

So große Bedeutung das Glas in der Röntgentechnik, für Vakuumröhren usw. gefunden hat, so wenig Eingang hat sich Glas als Isoliermittel in der Elektrotechnik zu verschaffen vermocht. Hier ist es wohl nur der Kondensatorenbau, für den das Glas neben dem Glimmer Bedeutung für die Elektrotechnik gefunden hat.

Für Freileitungsisolatoren ist zwar Glas namentlich in Amerika früher auch vielfach verwendet worden, doch hat sich Glas neben dem Porzellan nicht recht behaupten können. Maßgebend hierfür mag in Sonderheit die größere Sprödigkeit des Glases, seine geringere Widerstandsfähigkeit gegen schroffe Temperaturwechsel und die Tatsache gewesen sein, daß die Glasoberfläche von den Atmosphärilien angegriffen und daher allmählich rauh wird.

Vor allem die große Sprödigkeit der Glasisolatoren dürfte zumeist die Schuld an deren Versagen tragen. So wird aus verschiedenen Anlagen berichtet, daß bei Niedergang eines kalten Gewitterregens nach vorhergegangener starker Erwärmung massenhafte Sprünge an Glasisolatoren beobachtet worden sind; selbst die einseitige Sonnenbestrahlung nach einer besonders kalten Nacht soll ein Auslösen innerer Materialspannungen zur Folge gehabt haben. Jedenfalls ist es bei Glas außerordentlich schwer, derartige Materialspannungen mit völliger Sicherheit zu vermeiden. Solange dies nicht einwandfrei gelungen ist, dürften Glasisolatoren für Freileitungszwecke kaum Erfolg versprechen, zumal auch die geringere mechanische Festigkeit sich bei versuchsweise früher von der Reichspostverwaltung eingebauten Schwachstromisolatoren durch ein Abspringen der Isolatorköpfe in Kurven unangenehm bemerkbar gemacht hat.

Jedenfalls dürfte die Verwendung von Glas als Isoliermittel in der Elektrotechnik im Vergleich zu Porzellan stets nur auf verhältnismäßig geringe Anwendungsgebiete beschränkt bleiben.

Digitized by Google

V. Preßstoffe, plastische Stoffe, Papier und Gespinste.

Technologisches aus dem Gebiet der elektrischen Isolierstoffe.

Von Dr. A. Bültemann.

1. Leiter und Nichtleiter.

Wenn von „elektrischem Isoliermaterial" oder „Dielektrikum" oder „Nichtleitern" gesprochen wird, so bezeichnet man damit Stoffe, die nicht befähigt sind, die Erscheinungen zu übertragen, welche wir für gewöhnlich als elektrischen Strom bezeichnen. Sondern für den elektrischen Strom stellt äußerlich das Dielektrikum ein Hindernis dar.

Die Isolierstoffe bilden also das Gegenstück zu der anderen großen Gruppe von Materialien, den Leitern, welche in leichter Weise, ohne stoffliche Veränderung dabei zu erleiden, die Ausbreitung elektrischer Kraftentfaltung ermöglichen.

Dielektrika und Leiter sind die hauptsächlichsten Baustoffe, welche die Elektrotechnik für ihre Konstruktionen benötigt. Im folgenden soll die Gruppe der Nichtleiter vorzugsweise vom technologischen Standpunkt aus behandelt werden, die Erscheinungen in Leitern werden nur vergleichsweise herangezogen.

2. Vorstellung über das Wesen von Leitung und Nichtleitung.

Um allgemein verständlich zu sein, werde ich mich bemühen, die Vorgänge bei der Einwirkung der elektrischen Kräfte auf das Dielektrikum möglichst bildmäßig zu behandeln und rechnerische Erwägungen beiseite lassen. Ich hoffe, daß die tatsächlichen Erscheinungen dadurch nicht allzusehr verwischt werden.

Die theoretischen Erklärungen und Grundlagen für die isolierenden Vorgänge sind im 1. Teil dieses Buches von K. W. Wagner eingehend besprochen. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen und zum Ausdruck gebracht werden, daß die dort entwickelten Verhältnisse reiche Anregung geben, um vorhandene Mängel an technischen Nichtleitern zu beseitigen.

Bei der Fortpflanzung des elektrischen Stroms in Leitern, z. B. in Kupferdrähten, stellen wir uns vor, daß die Elektrizität darin in

Digitized by Google

der Form von deren kleinsten Massenteilchen vorhanden ist, welche wir als Elektronen bezeichnen, und daß diese Atome der Elektrizität, die Elektronen, die Stromleitung übernehmen. Sie sind zu einem bestimmten Teil jederzeit vom Molekül leicht lösbar. Wir denken sie uns in unendlich großen Mengen im Kupferdraht vorhanden und legen ihnen die Eigenschaft absoluter Bewegungsfreiheit bei. Ihr Zustand ist der eines beständigen Wirbels, wie dies den Molekeln der Gase eigentümlich ist. Bei der Elektrizitätsleitung kann man von einem Fließen des Elektronengases sprechen.

Man hat versucht, den Wert eines negativen Elektrons festzustellen und ist zu einem Gewicht von $0{,}96 \cdot 10^{-26}$ Gramm gelangt, was bedeutet, daß ein Elektron noch 2000mal so leicht ist wie die Masse des unter allen Körpern am wenigsten wiegenden Atoms, des Wasserstoffatoms, dessen Gewicht $1{,}70 \cdot 10^{-24}$ Gramm beträgt.

Die eine Hälfte der im Leiter befindlichen Elektrizitätsträger ist positiv geladen, die andere Hälfte, die Elektronen, negativ. Bei der Strombewegung begeben sich dann in gleichen Mengen die positiv geladenen Teile zum negativen Pol und die negativen Teile zum positiven. Der dabei entstehende Reibungswiderstand zwischen den Atomkomplexen und den Wanderteilchen muß überwunden werden, er tritt auf in Form von Wärme, die dem Ohmschen Widerstand und dem Quadrat der Stromstärke verhältnisgleich ist.

Bei den isolierenden Stoffen machen wir die Annahme, daß die Moleküle, aus denen das Dielektrikum aufgebaut ist, zweierlei Ladungen fest angeheftet enthalten und zwar solche, die positiv und andere, die negativ sind. Diese getrennt voneinander existierenden entgegengesetzt geladenen Elektrizitätsträger sind unlösbar mit dem Molekül verbunden, so daß durch Anlegen einer elektrischen Spannungsdifferenz im Gegensatz zum „Leiter" kein Losreißen stattfindet, und daher auch keine Wanderung der kleinsten Elektrizitätsmassenteilchen geschehen kann.

Es läßt sich deshalb leicht übersehen, daß das Zustandekommen eines elektrischen Stroms in einem Dielektrikum nicht möglich ist.

Ganz genau stimmt das Bild von der Unbeweglichkeit der Elektronen aber nicht. Sondern, wenn diese auch nicht abwandern können, so verschieben sie sich doch in gewissem Sinne gegenüber ihrer früheren Stellung zum Molekül, wenn unter einer Potentialdifferenz eine Erregung des Dielektrikums eintritt. Man kann bei dieser Erscheinung an das Verhalten eines elastischen Körpers unter Belastung denken. Die Verschiebung ist der Feldstärke verhältnisgleich.

Wie unter den „Leitern" der Elektrizität die Befähigung für die Stromübertragung bei den einzelnen Stoffen in verschiedener Weise vorhanden ist, indem z. B. Silber besser „leitet" wie Eisen, so sind die

Digitized by Google

isolierenden Eigenschaften der „Nichtleiter" untereinander ebenfalls sehr verschieden. Bekanntlich isoliert Hartgummi besser wie Vulkanfiber, Glas wie Schiefer, mit Bakelit oder Schellack zusammengepreßtes Papier besser wie Karton, usw.

Wird die Grenze der elektrischen Festigkeit durch Belastung des Isoliermaterials mit einer zu hohen Spannung überschritten, so tritt die Zerstörung der isolierenden Masse ein, die elektrische Kraft bricht sich gewaltsam Bahn[1]). Wir machen uns also nach dem Vorhergesagten hierbei das Bild, daß es der erhöhten Feldstärke gelungen ist, die Elektronen von den Molekülen fortzureißen. Damit hört der Stoff dann auf, isolierende Eigenschaften zu besitzen. Die bei der Vernichtung der Isolation auftretenden Begleiterscheinungen bewirken, daß der Durchbruchskanal zum Leiter geworden ist.

3. Aggregatzustände der Isolierstoffe.

Elektrische Isolierstoffe können fest, flüssig und gasförmig sein. Ein festes ist z. B.: Glimmer, ein flüssiges: Transformatorenöl, ein gasförmiges: Luft.

Verdünnte Gase zeigen eine verminderte Durchschlagsfestigkeit, welche um so mehr hervortritt, je stärker die Evakuierung stattgefunden hat. Die in luftleeren Röhren von der negativen Elektrode ausgehenden Strahlen werden als freie negative Elektronen, also als Elektrizitätsatome, angesehen. Werden Gase nicht verdünnt, sondern mittels Druck auf einen kleineren Raum zusammengepreßt, so steigt bei vielen die Durchschlagsfestigkeit ganz außerordentlich an und zwar ungefähr im direkten Verhältnis zum Druck. Bei Luft unter einem Druck von 10 Atmosphären erfolgt erst der Durchschlag unter einer Spannung, die 10mal so groß ist wie diejenige, bei welcher, 760 mm Quecksilbersäule vorausgesetzt, die Zerstörung eintritt. Also bei einer Elektrodenentfernung von 1 cm beträgt die Grenze für die elektrische Luftfestigkeit $10 \cdot 21000 \cdot \sqrt{2}$ = rund 290000 Volt Scheitelwert einer Wechselstromspannung von 50 Perioden. Ähnlich wie Luft verhalten sich hinsichtlich ihrer elektrischen Festigkeit innerhalb bestimmter Grenzen komprimiertes Kohlensäure- und Stickstoffgas.

---

[1]) Siehe K. W. Wagner, Der physikalische Vorgang beim elektrischen Durchschlag von festen Isolatoren. Abgedruckt in den Sitzungsberichten der Preuß. Akademie der Wissenschaften (phys.-mathem. Klasse) 1922, S. 438. Verlag der Akademie der Wissenschaften in Berlin.

Derselbe, J. of. Am. J. E. E. New-York, Dez. 1922, S. 1034.

G. Schulze, Ref. F. Helios 1923, S. 180.

Hayden, J. L. R. und Steinmetz, C. P., Insulation Failure — A Pyroelectric Effect. El. World 1922, H. 17, S. 865.

Bültemann, A., Neuere versuchstechnische Arbeiten über Nichtleiter der Elektrizität. Mitt. d. K. K. Technischen Versuchsamts Wien, VII. Jahrg. 1918, S. 43.

Digitized by Google

Bei der Erwärmung sinkt die elektrische Durchschlagsfestigkeit der Gase erheblich, sie ist der absoluten Temperatur umgekehrt verhältnisgleich.

4. Zerstörung der Isolierfähigkeit durch Elektrolyse und Elektroosmose.

Für denjenigen, welcher sich mit der gewerblichen Darstellung von isolierenden Substanzen befaßt, also für den Betriebsleiter von Fabriken elektrischer Isolierstoffe, besteht die Voraussetzung, daß dieser weiß, unter welchen Bedingungen die elektrische Isolation herbeigeführt wird[1]).

Um die Vorgänge in allen ihren Einzelheiten zu begreifen, fehlt uns jedoch bis heute noch eine ganze Menge an Erkenntnis und wissenschaftlicher Erforschung. Nichtsdestoweniger müssen wir es uns im Hinblick auf die zwingende Notwendigkeit der Schaffung technisch brauchbarer Isolierstoffe zur Aufgabe machen, die Erscheinungen bei Belastung der Dielektrika mit hohen Spannungen einstweilen durch analoge Erscheinungen und durch angestellte Versuche so zu erklären, daß wir eine Anschauung erhalten, welche den tatsächlichen Verhältnissen nahekommt, und welche uns einstweilen hilft, die Herstellung von brauchbaren Isoliermaterialien und deren weitere Vervollkommnung zu erreichen.

Wenn wir sagen, ein elektrisches Isoliermaterial leitet nicht den Strom[2]), so ist dies unrichtig. Sondern die Verhältnisse liegen so, daß eine geringfügige bei guten Isolierstoffen fast unmerkliche Leitfähigkeit stets vorhanden ist. Man kann sich leitende Teilchen im Dielektrikum eingebettet denken. In vielen Fällen, wo es sich um erstklassige Nichtleiter handelt, läßt sich diese Eigenschaft, den Strom fortzupflanzen, nur mit sehr feinen Meßinstrumenten nachweisen. Die Leitfähigkeit durch den Stoff ist der reziproke Volumwiderstand. Er wird vermindert, je höher der Wert des angelegten Potentialgefälles ist.

Der Stromdurchgang durch den Isolierstoff äußert sich in der Weise, daß hierbei Wärme entsteht. Steigert man die Spannung, so kann entsprechend der mehr oder weniger großen Isolierfähigkeit des Dielektrikums der Fall eintreten, daß der Leitungsstrom einen nennenswerten Betrag erreicht. Die erzeugte Wärme wird größer und fühlbarer, wenn die Ableitung durch das Material nicht in hinreichender Weise erfolgt. Schließlich dauert es dann nicht mehr lange, bis der Strom durchbricht und die Isolierung aufhebt.

---

[1]) Siehe hierzu James Clerk Maxwell, Electricität und Magnetismus. 2. Teil, X. Cap. u. a.

[2]) Lenard, P., Über Electricitätsleitung durch freie Ionen und Träger. Ann. d. Phys. 40, S. 393.

Wagner, K. W., Zur Theorie der unvollkommenen Dielektrika. Ann. d. Phys. 40, S. 870.

Digitized by Google

Aus diesen Vorgängen ist zu entnehmen, daß bei der Zerstörung der elektrischen Isolation der chemische Organismus des Isolierstoffs verändert wird. Wir haben es hier mit einer Erscheinung zu tun, die mancherlei Ähnlichkeit besitzt mit dem Durchgang des Stroms durch schlechtleitende Flüssigkeiten. Wie in diesem Falle durch vergrößerte Spannung und erhöhte Temperatur die Stromleitung möglich gemacht bzw. beschleunigt wird, so liegen bei einem festen Isolierstoff ähnliche Verhältnisse vor.

Es ist im Wesen der elektrischen Kraft begründet, daß sie versucht, die Stoffe zu dissoziieren, d. h. in Ionen zu zerlegen, um mit Hilfe dieser mit Elektronen versehenen geladenen Teilchen sich einen Weg zu bahnen.

Die durch den Stromdurchgang hervorgerufene Erwärmung bewirkt im Inneren des Dielektrikums Bildung von Feuchtigkeit. Wie hoch sich die Temperatur der Stellen beläuft, die vom Stromdurchgang betroffen sind, wissen wir bisher nicht. Aber es scheint, daß die örtliche Erwärmung beträchtlicher ist, als wir gewöhnlich annehmen. Um bei anscheinend ganz trockenen Stoffen eine erhebliche Feuchtigkeitsmenge hervortreten zu lassen, gehört durchaus nicht eine Temperatur von 100° C dazu. Denn die Verdampfung von Wasser setzt bereits bei niedriger Temperatur ein, wie die Trockenprozesse beweisen. Geschieht die Bildung von Feuchtigkeit im Inneren eines Körpers, so pflegen dabei zugleich Stoffe, aus denen der Körper zusammengesetzt ist, mit in Lösung zu gehen. In erhöhtem Maße ist dies der Fall unter dem Einfluß eines starken elektrischen Feldes.

Wir haben also bei der Erwärmung durch den Strom in festen isolierenden Stoffen, die hoher elektrischer Spannung ausgesetzt sind, mit dem Auftreten elektrolytischer Erscheinungen zu rechnen. Am reinsten tritt die Elektrolyse bei Anwendung von Gleichstrom hervor. Wechselstrom ist eine Zeit lang, wenn auch nur jedesmal für eine kurze Zeit, auch Gleichstrom. Allerdings liegen bei Wechselstrom die Verhältnisse erheblich komplizierter.

Je besser ein Isoliermaterial ist, um so höher muß die Spannung sein, damit der elektrolytische Lösungsdruck sich bemerkbar machen kann, und die Dissoziation der Bestandteile des Dielektrikums eingeleitet und weitergeführt wird, bis dann der Zerfall eintritt.

Die Abscheidung der wandernden Teilchen, also die Stromleitung, erfolgt bei der Elektrolyse nach dem von Faraday erkannten Äquivalenzgesetz. Dieses besagt, daß die Mengen der abgeschiedenen Stoffe den aufgewendeten Strommengen verhältnisgleich sind, und daß die Mengen der in gleichen Zeiten abgeschiedenen Zersetzungsprodukte im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen.

Wendet man obige Gesichtspunkte richtunggebend an, um hochwertige elektrische Isolierstoffe herzustellen, so heißt dies: Zur Erzielung einer hohen Isolierfähigkeit muß so verfahren

Digitized by Google

werden, daß nur Rohstoffe und Herstellungsmethoden in Anwendung kommen, welche der elektrolytischen Lösungstension, hervorgerufen von der Spannungsbelastung, einen möglichst großen Widerstand entgegensetzen.

Die elektrolytische Betätigungsweise ist aber nicht die einzige, welche an der Zerstörung elektrischer Isolierstoffe beteiligt ist, sondern fast immer kommen noch andere Prozesse hinzu und zwar solche, die man als Elektroosmose bezeichnet.

Bei der Elektrolyse waren es in Wasser gelöste Körper, die unter der Einwirkung der Spannung gezwungen werden, sich zu dissoziieren und dabei Ladungen anzueignen, um an der Wanderung teilzunehmen.

Im Gegensatz zu der Elektrolyse wandern bei der Elektroosmose keine gelösten dissoziierten Stoffe, sondern nichtdissoziierte Teilchen mannigfacher Art wie Kolloide, Suspensionen, Flüssigkeiten, nicht lösbare feste Körperchen wie zertrümmerte oder durch den Strom abgerissene Bestandteile des Isoliermaterials. Die Elektroosmose erfolgt neben der Elektrolyse. Es gilt die Regel, daß die Stoffe von höherer Dielektrizitätskonstanten sich positiv laden, wenn sie mit Stoffen einer niedrigeren Dielektrizitätskonstanten in Berührung kommen.

Da das Wasser eine spezifische Kapazität von rund 84 besitzt, also in dieser Beziehung einen bedeutend höheren Wert wie fast alle anderen Körper hat, so scheidet sich der suspendierte oder im Wasser schwimmende feste Stoff an der Stelle ab, wo der positive Strom eintritt. Das Wasser dagegen wandert zum negativen Pol. Wechselstrom wirkt auf das Gefüge des Materials stark zerrüttend, die Wanderungen werden in ihrer Richtung fortgesetzt unterbrochen.

Das Faradaysche Gesetz der Äquivalenz gilt bei der Elektroosmose nicht mehr, die Körper scheiden sich meistens in wesentlich größeren Mengen ab. Je höher die angelegte Potentialdifferenz und um so geringer die Entfernung der Elektroden voneinander ist, um so stärker vollzieht sich die Abscheidung der mitgerissenen Teile.

Bekannte Vorgänge elektroosmotischer Natur sind folgende:

Beobachtet man die an der Wand dicht nebeneinander angebrachten Drähte einer Klingelleitung, so kann man feststellen, daß der eine Pol, der positive, sich dick mit Staubteilchen umgeben hat. Die Unreinigkeiten der Luft sind unter dem Einfluß der Spannung hierher gewandert.

Belastet man einen Porzellanisolator mit hoher Wechselspannung, so erkennt man, besonders im Sonnenlicht, daß beim Anlegen der Potentialdifferenz Staubteilchen oder z. B. aufgestreutes Sägemehl fortgewirbelt wird. Vergrößert man die Spannung, so werden die bis dahin sitzengebliebenen gröberen Teilchen ebenfalls in Bewegung gesetzt.

Legt man erdfeuchten Torfbrei auf ein Drahtnetz, an welchem sich der negative Pol einer Gleichstromquelle befindet, und bedeckt

Digitized by Google

man den Torf mit einer Metallplatte, an welcher der positive Pol anliegt, so fließt das im Torf enthaltene Wasser in reichem Strahl plätschernd aus dem Drahtnetz heraus.

Quarz, Feldspat, Eisenkies und Glimmer fallen zu Boden. Kaolin ist elektronegativ und setzt sich an der Anode ab.

In elektrischen Isolierstoffen, wo sich durch hohe Spannungen bereits elektrolytische Einwirkungen geltend machen, pflegen fast immer elektroosmotische Erscheinungen hinzuzutreten. Durch das Entstehen von Feuchtigkeit und die angebahnte Wanderung der Elektrolyte wird die Stoffmasse zerrissen. Kleine Teilchen des Isoliermaterials nehmen Ladungen an. Das Wasser beteiligt sich an der Wanderung. Man pflegt bei elektrischen Durchschlägen reichlichen Wasseraustritt und Abscheidung von organischen und anderen Materialteilchen feststellen zu können. In welchem Verhältnis sich elektrolytische und elektroosmotische Prozesse nebeneinander abspielen und wie dies vom Material abhängt, wissen wir noch nicht.

Um brauchbares Isoliermaterial anzufertigen, ist aus den vorstehenden Ausführungen bei Beachtung der ersten Regel weiterhin so zu verfahren:

daß elektroosmotische Kräfte so wenig wie möglich auftreten dürfen. Man hat daher nicht nur der chemischen Zusammensetzung, sondern auch dem mechanischen Aufbau des Isolierstoffs erhebliche Beachtung zu schenken.

5. Der Einfluß der spezifischen Kapazität oder Dielektrizitätskonstanten.

Es war bei der Zerstörung elektrischer Isolierstoffe durch elektroosmotische Vorgänge von dem Einfluß und der Größe der spezifischen Kapazität die Rede. Die spezifische Kapazität oder Dielektrizitätskonstante der Stoffe spielt bei der Fabrikation von Isoliermaterialien eine wichtige Rolle.

Eine grundlegende Gesetzmäßigkeit bei der Anwendung der Elektrizität, von Coulomb erkannt, besagt, daß die Kraft, welche zwei elektrisch geladene Massen aufeinander ausüben, gleich ist dem Produkt ihrer Elektrizitätsmengen, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernungen voneinander. Diese Beziehungen gelten ohne Einschränkung jedoch nur, wenn das Dielektrikum, in welchem die Elektrizitätsmengen aufeinander wirken, Luft ist. Würden die geladenen Massen z. B. in Hartgummi eingebettet sein, so ändert sich die resultierende Kraft. In diesem Fall beträgt sie $^1/_3$ von vorher, bei Einlagerung in Paraffin nur $^1/_2$, in Öl $^1/_4$, in reinem Wasser $^1/_{84}$, weil die Dielektrizitätskonstanten von Hartgummi rund 3, von Paraffin rund 2, von Öl rund 4 und von Wasser rund 84 sind.

Digitized by Google

Die Elektrizitätsmengen besitzen in den aufgeführten Stoffen nur einen Teil der Spannung wie in Luft. Luft, oder genauer ausgedrückt der luftleere Raum, hat die Dielektrizitätskonstante 1. Sämtliche anderen Stoffe sind befähigt, größere Elektrizitätsmengen zu fassen. Die Gase haben fast sämtlich das gleiche Fassungsvermögen wie Luft, Wasser dagegen weist eine außergewöhnlich hohe spezifische Kapazität auf.

In Tabelle 1 sind die annähernden Werte von Dielektrizitätskonstanten uns hier interessierender Stoffe zusammengestellt:

Tabelle 1.

Luftleerer Raum	1	Schwefel	3,97
Luft	1,000590	Harz	2,5
Kohlensäure	1,000946	Kautschuk	3
Wasserstoff	1,000264	Ebonit	2,9
Methylalkohol	32	Glimmer	5—8
Äthylalkohol	26	Glas	6—10
+ 1 Vol. Wasser	29	Schellack	3—4
Amylalkohol	15	Bakelit	5,6—8,8
Äther	4,5	Preßspan	2—4
Schwefelkohlenstoff	2,6	Hartpech	1,8
Azeton	25	Wachs	1,86
Benzol	2,3	Porzellan	4,5—5,8
Toluol	2,4	Faturan (Traun)[1]	3,6
Terpentin	2,2	Tenazit (A.E.G.)[1]	5
Paraffinöl	2—2,5	Zellon[1]	5
Rizinus	4—5	Pertinax (Meirowsky)[1]	5,2
Leinöl	3—3,5	Eshalit (S.SW.)[1]	3,4
Mineralöl	2—4	Spezial-Karta (Continentale Isola-Werke)[2]	4,3
Petroleum	2,05	Hartgummi (S.SW.)[1]	2,1
Harzöl	2,5—3,5	Sillimanit	5,17[3]
Chloroform	5	Wasser	83,8
Anilin	7,3		
Paraffin, fest	2,3		

Bei Verminderung der Temperatur der Stoffe wächst der Wert der Dielektrizitätskonstanten an, ebenso steigt derselbe bei Feuchtigkeitsaufnahme. Die angeführten Flüssigkeiten sind Lösungsmittel, welche bei der Herstellung von Isolierstoffen Bedeutung haben.

Aus dem Coulombschen Gesetz, das allerdings erst viele Jahre später von Faraday durch Einführung des Begriffs der Dielektrizitätskonstanten[4] erweitert wurde, ist erkennbar, welcher hervorragende Ein-

[1] Bültemann, A., Isoliermaterialien der Elektrotechnik. E. u. M. 1917, Heft 48 und 49. — [2] Bültemann, A., Leiter und Nichtleiter der Elektrizität. Helios 1918, Nr. 19. — [3] Kock, F., Die Keramik im Dienste der Elektrotechnik. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1923, S. 992. — [4] Die Priorität gebührt Cavendish, er hat aber seine Untersuchungen nicht veröffentlicht.

Digitized by Google

fluß darin dem isolierenden Mittel zukommt. Man kann daher die scheinbar paradoxe Behauptung aufstellen, daß das Isoliermaterial der Leiter der Elektrizität ist, und die geladenen Metalle nur für die Richtung der elektrischen Kräfte maßgebend sind.

Die Dielektrizitätskonstante steht mit dem Wert für die elektrische Durchschlagsfestigkeit eines einheitlichen Isoliermateriales in keiner abhängigen Beziehung. Ein Isolierstoff mit einer hohen Dielektrizitätskonstanten kann eine niedrige Durchschlagsfestigkeit besitzen und umgekehrt. Ist eine isolierende Schicht jedoch aus mehreren Materialien von verschiedener spezifischer Kapazität zusammengesetzt, so tritt in diesem Falle die Wirkung der Dielektrizitätskonstanten nunmehr stark in Erscheinung.

Besteht zwischen zwei Punkten, z. B. Metallkugeln in Luft, eine Spannungsdifferenz, die sich ganz kurz vor der Funkenentladung befindet, und fügt man alsdann eine Glasplatte zwischen die Pole, so tritt jetzt Funkenüberschlag ein. Man hätte zunächst meinen sollen, daß das Glas, welches eine viel höhere Durchschlagsfestigkeit wie Luft hat, die Festigkeit der Strecke nicht nur nicht verschlechtert, sondern verbessert. Aber das Gegenteil ist der Fall.

Die Erklärung dieses Vorgangs beruht darin, daß Glas ein 7mal so hohes Fassungsvermögen für Elektrizität besitzt wie Luft. Der Spannungsabfall in Glas ist daher geringer, die anliegende Potentialdifferenz breitet sich daher auf der Strecke Luft-Glas-Luft so aus, daß die Durchschlagsfestigkeit der Luft überschritten und damit Funkenentladung herbeigeführt wird. Die Spannung verteilt sich im umgekehrten Verhältnis zur Kapazität, die Geschwindigkeit der elektrischen Wirkungen ist in den isolierenden Stoffen um so kleiner, je größer die Dielektrizitätskonstante der Stoffe ist.

Zwischen optischen und elektrischen Erscheinungen besteht die von Maxwell formulierte Beziehung, daß die Dielektrizitätskonstante gleich ist dem Quadrat des Brechungsindex.

Berücksichtigt man bei der Fabrikation der Dielektrika die Wirkungen der spezifischen Kapazität, so ergibt sich, daß vor allem Luft und Wasser in den Isolierstoffen nicht wirksam werden dürfen. Bei porösen Körpern tritt in den Hohlräumen infolge der bedeutend gesteigerten Felddichte Glimmen auf, welches zur schnellen Zerstörung des Materials Veranlassung gibt.

6. Methoden der Herstellung elektrisch isolierender Preßkörper zur Verwendung in der Apparate- und Hochspannungstechnik sowie für die Verwendung in Starkstromanlagen.

Die Richtlinien, wie man fabrikatorisch zu einem gut ausgebildeten Isolierkörper gelangt, sollen an einem Beispiel gezeigt werden.

Digitized by Google

In den ersten Zeiten der elektrischen Isoliertechnik wendete man als Ausgangsstoffe für eine bestimmte Art von Nichtleitern an:

1. einen organischen Körper, welcher elektrisch isoliert, als Bindemittel dient und alle übrigen Bestandteile durchtränkt, z. B. Harze, Peche, Kohlenwasserstoffe und dergl.,
2. einen Faserstoff, welcher die Festigkeit und Zähigkeit des herzustellenden Körpers hervorbringen soll, z. B. Papierzellstoff, Holzschliff, vor allem Asbest,
3. wurde dem Gemenge ein billiger Füllstoff zugesetzt, welcher die Kosten der Masse erniedrigt, z. B. fein gepulverte Mineralien wie Schiefer- und Quarzmehl, Kaolin, Ziegelpulver, Flußspat und dergl.

Die Verarbeitung dieser Stoffe zu festen Massen geht folgendermaßen vor sich. Es wurden ungefähr 20% Harze oder Pech als feines Pulver, 30% Asbestfaser, wie sie als Abfall von den Minen kommen, und 50% Mineralpulver gut gemischt und heiß verpreßt. Oder diese Stoffe wurden in einem Lösungsmittel des organischen Bestandteils, z. B. in Benzol, verrührt, so daß das Pech bzw. Harz in Lösung geht, und zugleich eine Mischung von Pech, Asbestfaser und Mineralpulver entsteht. Das Benzol wurde dann verdunstet, die übrigbleibende heiße Masse unter Druck in die gewünschten Isolierkörper gepreßt.

Auf diese Weise erhielt man damals ein Material, das bei der Prüfung im trockenen Zustande unter Umständen eine gewisse Isolation zeigte, dieselbe aber nach 24stündigem Liegen im Wasser meistens einbüßte.

Will man auf Grund der vorher angestellten Überlegungen dieses Material verbessern, so ist zur Erzielung höherer Isolationswerte das Augenmerk darauf zu richten, elektrolytische Unangreifbarkeit der Rohmaterialien herbeizuführen und das Auftreten elektroosmotischer Kräfte zu unterbinden. Es muß also zunächst dafür gesorgt werden, daß alles in den Rohmaterialien befindliche Wasser in vollständiger Weise entfernt wird. Würde man Asbest und Mineralpulver im Ofen trocknen, so gelangt man nicht zum Ziel, denn es ist auf diese Weise unmöglich, alle Feuchtigkeit wegzuschaffen.

Man vereinigt deshalb zweckmäßig das Mischen der Ausgangsstoffe mit der Entwässerung, indem man die Rohmaterialien mit reichlichen Mengen Benzol tränkt, so daß ein flüssiger Brei entsteht. Dieser Schlamm wird in einer Dampfblase erhitzt, und unter ständigem mechanischen Rühren der Massen wird das Benzol übergetrieben. Dabei reißt das Benzol das Wasser mit.

Besonders auf kräftiges Durchmischen während des Abdampfprozesses ist großer Wert zu legen, damit fortgesetzt die Massen ausgebreitet werden, und sie Gelegenheit haben, das Benzol abzugeben.

Digitized by Google

Das Lösungsmittel, in diesem Fall also Benzol, darf sich bei den vorkommenden Temperaturen nicht zersetzen. Man nimmt zweckmäßig sogenanntes 90er Benzol. Rückstände jeder Art müssen vermieden werden.

Wird auf das Rühren während des Abdampfens nicht die denkbar größte Sorgfalt gelegt, entstehen Nester in der Masse, die wasser- und benzolhaltig bleiben und daher später die ganze Preßmasse verderben. Das Rühren in dem doppelwandigen, durch Dampf von mehreren Atmosphären Druck geheizten Kessel erfordert großen Kraftaufwand, infolgedessen hat das Rührwerk stark konstruiert zu sein.

In einem durch kaltes Wasser gekühlten Kondensator werden die übergehenden Benzoldämpfe verflüssigt. Dann gelangt das Kondensat in den Rezipienten, wo sich Wasser und Benzol infolge der Verschiedenheit ihrer spezifischen Gewichte trennen. Das Lösungsmittel kann für den nächsten Abdampfprozeß wieder benutzt werden.

Die nach der vorstehenden Methode hergestellten Isolierkörper haben eine ganz wesentlich vergrößerte elektrische Durchschlagsfestigkeit. Infolge des verminderten Wassergehaltes — es sind nur noch Spuren vorhanden — ist die Dissoziation erschwert und ebenso die Elektroosmose.

Man kann die elektrische Festigkeit und das Isoliervermögen der Masse weiter steigern, wenn die Entwässerung noch intensiver durchgeführt wird. Dies geschieht durch Anwendung von Vakuum während des Abdampfprozesses, ferner durch mehrfaches Abdampfen mit wasserfreiem Lösungsmittel hintereinander.

Die auf diese Art hergestellten hochisolierenden Dielektrika können in der Apparate- und Hochspannungstechnik Verwendung finden, wo es nicht auf Wärmebeständigkeit ankommt, sondern mehr auf hohe Durchschlagsfestigkeit und Isolierfähigkeit. Auch die mechanischen Eigenschaften und das Verhalten gegenüber Feuchtigkeitseinflüssen sind bei diesen Massen gut.

Infolge der Verarbeitung von gewöhnlichem Harz (Fichtenharz) oder Hartpech ergibt sich der Mangel, daß diese sonst sehr wertvollen elektrischen Körper schon bei Temperaturen von 60—80° weich werden. Sie sind deshalb für die Verwendung in Starkstromnetzen, also in Zentralen mit 750—1000 V. Betriebsspannung, ungeeignet und daher an dieser Stelle unzulässig. In Störungsfällen, z. B. bei schlechten Kontakten, fallen diese Isolierstoffe infolge eintretender Erweichung des Dielektrikums auseinander, sie gefährden daher die Sicherheit der Anlage.

Wenn man in der Auswahl der Rohmaterialien noch zweckmäßiger verfährt, so gelingt es, nach dieser Methode ein Material für die Verwendung in Starkstromnetzen herzustellen, das den jetzigen Anforderungen der Elektrotechnik genügt. Man darf aber nicht das früher benutzte Hartpech, ein Produkt der Kohlenteerdestillation, benutzen.

Digitized by Google

Denn Hartpech ist aus vielen Stoffen, die teilweise einen sehr niedrigen Schmelzpunkt besitzen, zusammengesetzt, es enthält mitunter bis 40% freien Kohlenstoff und oft Wasser eingeschlossen. Sondern man hat Hartpech durch hochschmelzende Asphalte zu ersetzen. Ebenso darf man nicht die gewöhnlichen niedrig schmelzenden Harze hier verwenden.

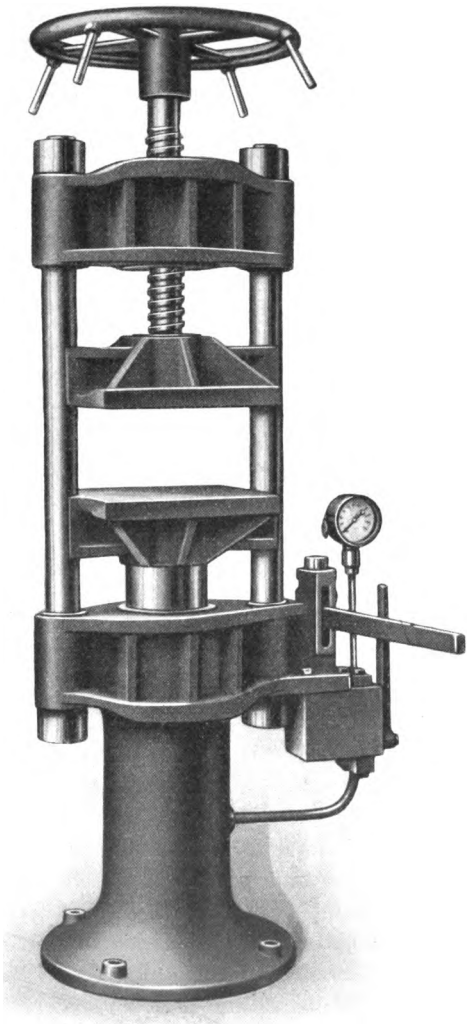


Abb. 1. Hydraulische Presse mit Handbetrieb zur Herstellung von isolierenden Formstücken.

Für manche Zwecke ist die Benutzung von Kopalen zulässig. Es sind hochschmelzende fossile Harze, die vorher noch aufbereitet werden müssen. Sie lösen sich nicht in Benzol, sondern in alkoholischen Lösungsmitteln.

Hat man die drei Hauptbestandteile, Asphalt, Faserstoff und Mineral, von Lösungsmitteln gänzlich befreit und heiß aus der Abdampfblase herausgenommen, so ist die Masse jetzt ziemlich beständig, man braucht sie nicht allzu ängstlich vor Feuchtigkeit zu schützen. Hier erkennt man die Wirksamkeit der elektrischen Kräfte. Asbest und Mineralpulver leiten sofort, aber nicht weil das in ihnen befindliche Wasser leitet, denn Wasser ist ein gutes Dielektrikum. Sondern weil unter dem Einfluß elektrischer Spannung das in lufttrockenem Asbest bzw. lufttrockenem Mineralpulver befindliche Wasser Veranlassung zur Dissoziation der Bestandteile gibt. Eine Masse, die nach vollendetem Abdampfprozeß einen Feuchtigkeitsspritzer abbekommen hat, läßt sich verarbeiten, ohne daß erfahrungsgemäß eine wesentliche Verschlechterung der elektrischen Isolation eintritt.

Digitized by Google

Die aus dem Kessel kommende Masse ist entweder heiß in kalten Formen oder nach Durchgang durch Schleudermühlen zerkleinert in heißen Formen zu verpressen. Je weicher sie ist, d. h. je mehr Asphalt sie besitzt, um so geringer kann der Preßdruck sein. Wertvolle Isolierkörper sollen aber nicht weiche, sondern harte Beschaffenheit besitzen. Man schränkt daher den Gehalt an den isolierenden Bindemitteln nach Möglichkeit ein, benötigt dann aber höheren Preßdruck.

Der Preßdruck steht in festen Beziehungen zur elektrischen Isolation und Durchschlagsfestigkeit. Man kann leicht feststellen, daß dieselbe Preßmasse bei Anwendung von höherem Druck elektrisch besser ist wie bei geringerem. Es ist dies nach den vorausgegangenen Ausführungen durchaus verständlich. Hat man es mit Asbestpreßlingen zu tun, so liegt die Grenze, wo keine Isolationssteigerung mehr eintritt, bei ungefähr 800 kg/qcm.

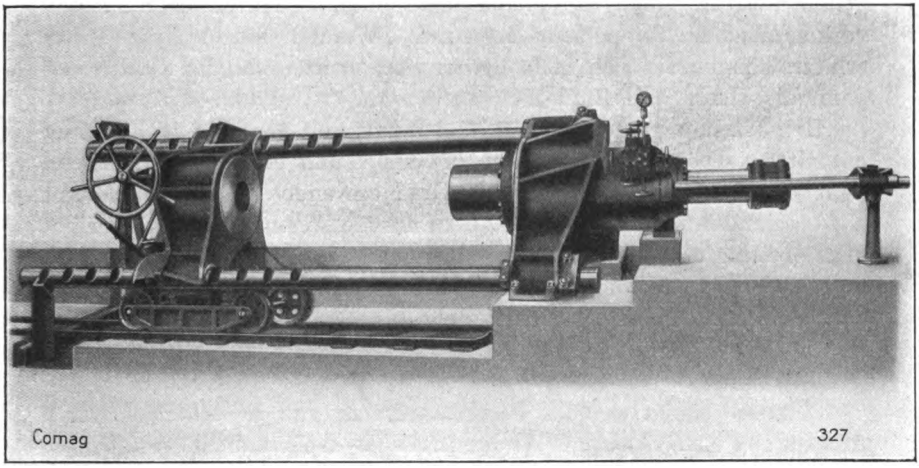


Abb. 2. Hydraulische Spezialpresse für elektrisches Isoliermaterial.

Die Abb. 1 und Abb. 2 geben ein Bild gebräuchlicher Pressen, wie sie die Cottbuser Maschinenbau A.-G. für diese Zwecke anfertigt.

Preßt man eine wollige oder zerkleinerte in der Dampfblase gemischte und vom Lösungsmittel befreite Isoliermasse kalt zusammen und erhitzt die Form auf den Erweichungsgrad des Bindemittels, so muß vorher die Luft aus der Preßmasse entfernt werden. Zu diesem Zweck wärmt man erst bei 50 bis 60 Grad die Masse durch und übt einen schwachen Druck mit dem Stempel aus. Vorhandene komprimierte Luft hat beim darauffolgenden Abheben des Stempels Gelegenheit zum Entweichen. Der Preßling wird später bei Anwendung des hohen Drucks nicht erheblich mehr in seinem Volumen verändert.

Beim Pressen entsteht im Inneren des Körpers stets eine mehr

Digitized by Google

oder weniger große Ungleichmäßigkeit, indem die am weitesten vom Stempel entfernten Teile des Inneren weniger Druck abbekommen. Diese Schichtenbildung ist aus mechanischen wie elektrischen Gründen sehr in Betracht zu ziehen, besonders wenn komplizierte Formstücke hergestellt werden sollen. Mit einiger Geschicklichkeit in der Füllung der Matrize läßt sich ein Ausgleich schaffen. Die Oberfläche des Preßkörpers, die Preßhaut, ist am widerstandsfähigsten. Man soll sie möglichst bei der Verarbeitung erhalten, denn sie hat im allgemeinen den höchsten mechanischen wie elektrischen Widerstand.

Zu beachten ist, daß man die ersten Preßlinge nicht benutzen kann, welche mit neuen Preßformen hergestellt sind. Das Eisen muß sich erst mit einer feinen Oxydschicht überziehen, sonst setzen sich unsichtbare feine Metallteilchen auf der Oberfläche des Preßkörpers fest.

Das organische Bindemittel, der Asphalt, soll, wie schon hervorgehoben wurde, homogen sein, er darf sich nicht bei der beim Pressen vorkommenden Temperatur zersetzen. Werden fossile Harze stark erhitzt, können sie sich leicht hydrolytisch spalten, sandig werden und dann die Deck- und Bindekraft verlieren.

Es ist schon hervorgehoben, daß Harze und Asphalte auch Wasser enthalten. Dies haftet sehr fest in ihnen und entweicht erst, wenn man Temperaturen von 140—160 Grad anwendet. Oftmals schäumt die geschmolzene Masse hoch auf. Für hochwertige Isolierkörper hat man gereinigte Asphalte zu verwenden, diese sind dann außerordentlich schwer dissoziierbar und sehr wärmebeständig. Der Schmelzpunkt der fossilen Asphalte und Peche geht bis 230 Grad C hinauf.

7. Die Verarbeitung von Zellstoff und Papier.

Zellulose eignet sich als Faserzusatz sehr gut, sie läßt sich durch Anwendung des richtigen Bindemittels zu Isolierstoffen verarbeiten, die, der freien Luft ausgesetzt, Temperaturen von 150 Grad und noch etwas mehr aushalten. Durch Zusatz von Zellstoff wird eine mechanisch zähe Masse zustande gebracht. Die Benutzung von Papier bei der Herstellung von gewickelten Nichtleitern, welche in der Apparate- und Hochspannungstechnik große Verwendung finden, hat einen bedeutenden Umfang angenommen. Über Zellstoff und Papier als Träger der Isolation von Dielektriken wird später noch eingehend berichtet.

8. Torf als Isoliermaterial.

Ein faseriges Material ist auch der Torf, vor allem dessen jüngere Bestandteile, welche sich durch reichlichen Gehalt an Eriophorumfaser auszeichnen.

Preßt man gut getrockneten, fein gemahlenen Torf, am besten Hochmoortorf, unter Zusatz von ebenfalls getrocknetem Fasertorf zu-

Digitized by Google

sammen, so erhält man politurfähige Körper von ebenholzartigem Aussehen, die elektrisch isolieren und auch hohe Durchschlagsfestigkeit besitzen. Aber diese Torfmassen sind sehr empfindlich gegen Feuchtigkeit, sie fallen in der Nässe auseinander. Größere Stücke reißen bei Feuchtigkeitsschwankungen kreuz und quer.

Wenn man trockenen Torf mit Schwefel-, Pech- oder Harzlösungen kocht und das Lösungsmittel übertreibt, so kann man aus diesen Massen bei gleichzeitiger Anwendung von Druck und Hitze Körper herstellen, die mechanisch leidlich fest sind und sich durch ein geringes spezifisches Gewicht auszeichnen.

Jedoch sind diese Massen trotz sehr guter elektrischer Eigenschaften nicht hinreichend feuersicher, selbst nicht bei Zusatz großer Mengen mineralischer Füllmittel. Witterungsbeständig sind die Torfmassen ebenfalls nicht.

Die Verwendung von Torf als Fasermaterial hat bei der Herstellung von Isolierstoffen weder technisch noch wirtschaftlich Sinn. Die Festigkeit von Zellstoff- und Asbestfaser übertrifft diejenige der Torffaser ganz bedeutend. Von ersteren braucht man wesentlich weniger zuzusetzen.

9. Aufbereitung von Asbest.

Eür Preßstoffe, wie sie in Starkstromnetzen Anwendung finden, ist Asbest das gegebene Fasermaterial. Er ist ein Magnesiumsilikat, das sich nach Abtrennung von den verunreinigenden mineralischen und sonstigen Beimengungen in mehr oder weniger feine Fasern zerlegen läßt. Kanadischer Asbest ist weich und talkumhaltig, russischer Asbest ist steiniger und fester. Beide Sorten sind gut verwendbar, auch zusammengemischt. Zur Herstellung elektrischer Isolierkörper muß die Faser gut aufgeschlossen sein, was mittels eines Desintegrators möglich ist. Da auf den Minen in Kanada und beim Abbau der Asbestfundgruben in Rußland, wo Tagebau herrscht, oft Eisenteile wie Schrauben, Muttern, Drahtreste, Nägel und dergl. in den Asbest gelangen können, schickt man die Faser vorher über einen Magnetapparat.

Für besonders hochwertige Dielektrika benutzt man Asbestspinnfaser[1]). Die Herstellung ist mit Maschinen möglich, wie sie in der Textilindustrie vorkommen. Das Verfahren ist ziemlich kostspielig, man erhält eine voluminöse wollige Masse, bestehend aus dünnen weißen Fäden. Der Prozentsatz an Spinnasbestfaser braucht im Isoliermaterial nicht sehr groß zu sein, es genügen meistens 2—3%. Die

[1]) Vergl. Schreckenbach, Die Verarbeitung des Asbests. Kunststoffe 1922, S. 129.
Dr. P. Martell, Über Asbest. F. Helios 1923, S. 32. Diss. von Bayer und Burgmann, Dresden.

Digitized by Google

mit derartiger Spinnfaser zusammengesetzte Masse nimmt vor der Pressung ein sehr großes Volumen ein.

Der Isoliertechniker, welchem es auf Erzielung eines zähen Materials ankommt, kann nicht genug darauf bedacht sein, ein ganz fein verteiltes filzartiges Asbestgewebe zu schaffen. Elektrische Isolation und mechanische Festigkeit werden erhöht, wenn die Preßmasse wollig und dabei gut gemischt ist.

10. Mineralische Füllmittel.

Von den mineralischen Füllmitteln sind für die Fabrikation guter Sorten von Isolierstoffen naturgemäß nur solche zu verwenden, die keinen Anlaß zur Dissoziation geben oder mit leitenden Bestandteilen durchsetzt sind. Stark eisen- oder sonst metallhaltige Mineralien scheiden aus. Brauchbare Füllstoffe sind z. B. Quarzmehl (Siliziumdioxyd), Kaolin (Tonerdehydrat) und Flußspat (Fluorkalzium). Das Mineralpulver soll eine bedeutende Mahlfeinheit aufweisen und fast vollständig durch ein Drahtnetz hindurchgehen. welches 5000 Maschen/qcm enthält.

11. Beispiel.

Um ein gut isolierendes durchschlagfestes Isoliermaterial mit besten mechanischen Eigenschaften herzustellen, verfährt man folgendermaßen:

Es werden 120 kg fossiler Asphalt, z. B. Gilsonitpulver, 50 kg Spinnfaser-Asbest der Faserlänge von 5—10 mm und 830 kg staubfeines Quarzmehl von mindestens 5000er Siebung im Schleuderkasten innig gemischt.

Diese Mischung schüttet man in einen Abtreibekessel, der Benzol enthält, und zwar so viel, daß ein flüssiger Brei entsteht.

Ungefähr eine Stunde wird die Masse bei allmählich anwachsender Erwärmung durchgerührt. Im Verlauf weiterer 6—8 Stunden ist unter Anwendung von Vakuum bei ungefähr 140—160 Grad gewöhnlich der Abdampfprozeß beendet.

Dieser Vorgang wird ein zweites Mal mit dem vorher benutzten Benzol, das man von dem mitgerissenen Wasser getrennt hat, und dann je nach dem späteren Verwendungszweck evtl. noch ein drittes Mal mit frischem wasserfreien Benzol wiederholt. Die Masse wird dann direkt aus dem Kessel heraus in Formen verpreßt, die ungefähr 200 Grad warm sind. Der Preßdruck beträgt 800 kg/qcm.

Man kann feststellen, daß das elektrische Isoliermaterial fester und zäher ist wie manche Eisensorten. Die Durchschlagsfestigkeit solcher Körper beträgt ungefähr 20000 V/mm, Wasserlagerung übt auf die elektrischen Eigenschaften keinen Einfluß aus, die Gewichtszunahme bleibt unter 0,01 %. Brennbar und entflammbar ist die Masse nicht, bis zu 150 bis 190 Grad bleibt sie völlig unverändert. Auch gegen Säuren und Alkalien sowie gegen Frost ist sie beständig.

Digitized by Google

Derartiges hochwertiges Material kann mit dem besten Hartgummi in Wettbewerb treten. Es übertrifft Hartgummi noch insofern, als seine Oberflächenleitfähigkeit durch Lichtbestrahlung nicht herabgesetzt wird, und die Temperaturbeständigkeit ebenfalls eine höhere ist.

12. Isolierende Bindemittel.

Für Preßkörper, wie die eben behandelten, ist in elektrischer Beziehung die Beschaffenheit des Bindemittels ausschlaggebend. In vielen Fällen kommt es dem verarbeitenden Ingenieur auf eine hohe Oberflächenisolation des Dielektrikums an. Da die Luft stets Feuchtigkeit enthält, ist festzustellen, in welcher Weise das Bindemittel unter Spannung durch Luftfeuchtigkeit leitend beinflußt wird. Man hat sich also in Rücksicht auf den Verwendungszweck das vorteilhafteste Bindemittel auszuwählen.

Untersuchungen von Bindemitteln sind neuerdings von Harvey L. Curtis[1]) in eingehender Weise vorgenommen, einige Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2.

Oberflächenwiderstand in Luft von 90—100% Feuchtigkeit.

Zeresin	> 100000	Millionen	Megohm/cm
Spezial-Paraffin	> 100000	„	„
Paraffin	7000	„	„
Bakelit 558	900	„	„
Gelbes Bienenwachs . .	500	„	„
Kolophonium	200	„	„
Schwefel	100	„	„
Siegelwachs	80	„	„
Bernstein	6	„	„
Schellack	10000	Megohm	

Man erkennt, wie außerordentlich verschieden sich die Stoffe hinsichtlich ihrer Oberflächenleitfähigkeit verhalten, und welche Möglichkeiten der Isoliertechniker besitzt, die Beschaffenheit seiner Fabrikate zu verändern. Besonders soll hingewiesen werden auf die hervorragend günstigen Eigenschaften des Paraffins, eines Grenz-Kohlenwasserstoffs, welches unter Spannung bei Gegenwart von Wasserdampf nur eine sehr geringe Neigung zum Leiten bekundet.

13. Oberflächenwiderstände gebräuchlicher Isoliermaterialien.

In der folgenden Tabelle 3 sind die Oberflächenwiderstände einiger viel in der Praxis verwendeter Isoliermaterialien aufgeführt, auch auf Grund der Curtissehen Arbeiten.

[1]) Bureau of Standards, Washington 1915.

Digitized by Google

Tabelle 3.

Oberflächenwiderstand in Luft von 90—100% Feuchtigkeit.

Paraffiniertes Mahagoniholz	7000	Megohm/cm
Weißer Glimmer	5000	„
Preßglimmer	3000	„
Paraffiniertes Ahornholz	2000	„
Paraffiniertes Pappelholz	2000	„
Zelluloid	1000	„
Glas (Kavalier)	1000	„
Hartgummi, neu	1000	„
Glasiertes Porzellan	600	„
Gummon-Masse	400	„
Fiber, rot	200	„
Geschmolzener Quarz	200	„
Unglasiertes Porzellan	60	„
Elfenbein	40	„
Roter Marmor, Tennessee	30	„
Glasscheiben	20	„
Italienischer Marmor	20	„
Blauer Marmor, Vermont	10	„
Schiefer	10	„

Dielektrika, bei denen in der Praxis die Oberflächenisolation eine große Bedeutung besitzt, sind z. B. Glimmer und Porzellan. Man erkennt aus der Tabelle, daß Porzellan weit an Güte hinter den vorher gekennzeichneten löslichen Bindemitteln zurückbleibt. Es legt dies den Gedanken nahe, weniger gute Massen, die aber hinreichend durchschlagsfest sind, mit solchen von höherer Oberflächenisolation zu überziehen. Beachtenswert ist, daß der anorganische Schwefel eine 100 000 mal bessere Oberflächenisolation wie Porzellan besitzt.

Bei den Isolierstoffen hat man zu prüfen, ob die Oberflächenisolation in feuchten Räumen auch eine dauernde ist. Es ist dies durchaus nicht immer der Fall. Die Glassorten sind z. B. trocken sehr widerstandsfähig, aber nur in geringem Maße bei Gegenwart von Feuchtigkeit. Wasser löst Glas, welches eine feste Lösung von Alkali- und Kalksilikat darstellt, in geringem Maße auf, die Oberfläche wird dadurch rauh, die elektrische Isolation der Fläche sinkt auf geringe Werte herab.

Daß ein Dielektrikum, welches hohe Oberflächenisolation besitzen soll, eine glatte, möglichst fein geschliffene oder polierte, Fläche aufzuweisen hat, versteht sich von selbst, denn an rauhen Flächen kondensiert sich Wasser. Es sind also nicht nur Schönheitsrücksichten, welche tadellose Flächen verlangen. An nicht glasiertem Porzellan würde sich z. B. bald eine leitende Staubschicht ausbilden.

Digitized by Google

14. Volumwiderstände gebräuchlicher Isolierstoffe.

Um einen Überblick über die innere Isolierfähigkeit einer Anzahl Materialien zu geben, sind die Volumwiderstände derselben, wie sie von Curtis gefunden wurden, in der nachfolgenden Tabelle Nr. 4 zusammengestellt.

Tabelle 4. Volumenwiderstände.

Zeresin	> 5 000 000	Millionen Megohm cm^2/cm
Spezial-Paraffin	> 5 000 000	„
Geschmolzener Quarz	> 5 000 000	„
Hartgummi, neu	1 000 000	„
Weißer Glimmer	200 000	„
Schwefel	100 000	„
Bernstein	50 000	„
Kolophonium	50 000	„
Bakelit 558	20 000	„
Paraffin	10 000	„
Schellack	10 000	„
Glas (Kavalier)	8 000	„
Siegelwachs	8 000	„
Bienenwachs	2 000	„
Preßglimmer	1 000	„
Unglasiertes Porzellan	500	„
Glasplatten	20	„
Paraffiniertes Mahagoniholz	4	„
Gummon	3	„
Bakelit 1	200 000	Megohm
Paraffiniertes Pappelholz	50 000	„
„ Ahornholz	30 000	„
Zelluloid	20 000	„
Italienischer Marmor	10 000	„
Fiber, rot	5 000	„
Marmor, rosenrot, Tennessee	5 000	„
„ blau, Vermont	1 000	„
Elfenbein	200	„
Schiefer	100	„

Man sieht, daß die in den Tabellen 2 und 3 gekennzeichnete Einwirkung der Luftfeuchtigkeit bei Spannungsbelastung an der Oberfläche der Dielektrika stärker in Erscheinung tritt als bei der inneren Isolierfähigkeit der Stoffe.

15. Die Lösungsmittel.

Über die Lösungsmittel, welche bei den isolierenden Bindestoffen zur Anwendung gelangen, ist zu sagen, daß sie meistens feuergefährlich

Digitized by Google

und äußerst giftig sind. Früher hat man, was den letzteren Gesichtspunkt betrifft, dies nicht in hinreichender Weise gewußt. Besonders wurde das im angeführten Beispiel zum Lösen von Asphalt benutzte Benzol, welches in der elektrischen Isoliertechnik in der umfangreichsten Weise verwendet wird, für harmlos gehalten. Es ist beachtlich, daß schon durch Einatmen kleiner Mengen Benzolgas schwere Schädigungen der Gesundheit eintreten können. In welcher Weise Benzol das Blut zersetzt, ist noch nicht genügend aufgeklärt, beide Arten von Blutkörperchen werden scheinbar zerstört. Auf Frauen wirkt Benzol meistens heftiger ein wie auf Männer. Todesfälle und Erscheinungen völliger Invalidität kommen selbst bei oft nur kurzer Beschäftigung in benzolhaltigen Räumen vor. Prof. Lehmann[1]), der Vorstand des Würzburger Hygienischen Instituts, hat festgestellt, daß durch Benzol sehr schwere Störungen im Organismus hervorgerufen werden. Andere Forscher sind zu denselben Ergebnissen gekommen. Es soll deshalb hier nicht unterbleiben, auf diese Tatsachen hinzuweisen, damit die erforderlichen Vorbeugungsmaßregeln stattfinden. In den benzolfreien Räumen ist selbstverständlich die Belegschaft viel leistungsfähiger.

Alkoholische Dämpfe, welche bei der Verarbeitung fossiler Harze in der elektrischen Isoliertechnik auftreten, sind ebenfalls nervenzerstörend, wenn sie dauernd eingeatmet werden.

Besonders giftig ist Schwefelkohlenstoff (CS_2), außerdem selbstentzündlich. Man hat beobachtet, daß Schwefelkohlenstoff durch Staub entzündet wird. Auch muß man sich hüten, die Schwefelkohlenstoffgase mit 2 verschiedenen sich berührenden Metallen in Verbindung zu bringen, da die Erfahrung gelehrt hat, daß wahrscheinlich infolge des dann auftretenden galvanischen Stroms Explosionen herbeigeführt werden. Es entstehen dann die beiden Gase Kohlensäure und schweflige Säure. Wenn man Schwefelkohlenstoff als Lösungsmittel für Schwefel in eisernen Kochkesseln benutzt, entsteht Schwefeleisen, welches pyrophor ist, d. h. Schwefeleisen beginnt bei Luftzutritt zu glühen und bringt dann Schwefelkohlenstoffgas zur Explosion.

Besser als das Verbleien der Eisengefäße, um die Bildung von Schwefeleisen zu verhindern, ist es, wenn man der Lösung etwas Pech oder Asphalt zugibt. Dies schadet der aufzubereitenden Masse im allgemeinen nicht. Im Gegenteil, es bringt isoliertechnisch meistens Vorteile mit sich. Dadurch wird das Innere des Eisenkessels sowie das eiserne Rührwerk mit einer schützenden Asphaltschicht bedeckt.

Da Schwefelkohlenstoff wesentlich schwerer wie Wasser ist, schwimmt das letztere obenauf. Die Trennung läßt sich glatt vollziehen.

Bei der Herstellung elektrisch isolierender Stoffe unter Benutzung des anorganischen Schwefels als isolierendes Bindemittel hat man auch

[1]) Archiv für Hygiene 1912, Bd. 75, S. 1.

Digitized by Google

andere Flüssigkeiten an Stelle von Schwefelkohlenstoff als Lösungsmittel versucht. Sie sind teilweise weder explosiv noch brennbar. Aber sie besitzen den Übelstand der Zersetzlichkeit bei höheren Temperaturen, der weniger großen Aufnahmefähigkeit an Schwefel und pflegen außerdem einen zu hohen Siedepunkt zu besitzen. Nicht jeder Schwefel ist in Schwefelkohlenstoff löslich. So löst sich z. B. die sublimierte Art, sogenannte Schwefelblüte, nicht auf, wohl aber der gegossene Stangenschwefel.

Für das Verpressen der mit Schwefel hergestellten isolierenden Masse ist beachtlich, daß reiner Schwefel bei ungefähr 115—120° leicht flüssig ist, bei steigender Temperatur aber dickflüssig wird und bei 220° eine zähe dicke Masse bildet. Steigert man die Hitze weiter, tritt dann allmählich wieder Dünnflüssigkeit ein.

Schwefel ist in seinem Verhalten ein hervorragendes Dielektrikum, das als Mitbestandteil isolierender Massen eine Steigerung wünschenswerter Eigenschaften herbeiführen kann.

16. Hochschmelzendes Pech-Schwefel-Kondensat. Cumaronharze.

Das im Teer enthaltene Pech läßt sich für isoliertechnische Zwecke dadurch wesentlich verbessern, wenn Teer mit Schwefel behandelt wird.

Durch den Zusatz von Schwefel wird eine Molekular-Kondensation hervorgerufen, indem dabei das sich bildende Produkt einen höheren Siedepunkt erhält. Bei dieser Reaktion tritt Wasserstoff auf, es entwickelt sich dann Schwefelwasserstoff. Der so gewonnene künstliche Asphalt hat die Eigenschaft, daß er in kochendem Wasser nicht mehr erweicht. Man verfährt so, daß man nach Abdestillierung von etwa $^1/_3$ des Teers dem bei 50° noch vollständig weichen Pech allmählich 5% Schwefel zusetzt und den Erhitzungsprozeß so lange weiter treibt, bis die Bildung von Schwefelwasserstoff beendet ist.

Da das Teerpech Stoffe mechanisch beigemengt enthält, die gute Leiter sind, wie z. B. Kohlenstoff und dgl., kann man durch einen Lösungsprozeß das Pech reinigen. Aus der filtrierten Lösung wird das Lösungsmittel, z. B. Benzol, durch Destillation im Vakuum abgetrieben. Das so entstehende reine Pech-Bitumen, welches plastisch ist, wird mit Schwefel versetzt und bei Hitze behandelt. Der Rückstand ergibt ein elektrisch hoch isolierendes Bindemittel, welches einen Schmelzpunkt weit über 100° besitzt.

Synthetische Harze, die einen hohen Schmelzpunkt und zwar bis 200° C und darüber besitzen, sind die sog. Cumaronharze. Sie entstehen durch Polymerisation aus Solventnaphtha, indem meistens Schwefelsäure als Kontaktmittel benutzt wird. Je nach Temperatur und Zeit der Reaktion erhält man verschieden wärmebeständige und verschieden

Digitized by Google

lösliche Kunstharze. Wird unreines Cumaron, mit Xylol und anderen Teerdestillaten versetzt, auf Harz hin verarbeitet, entsteht ein Produkt, das einen erheblich niedrigeren Schmelzpunkt, oft nur 60° C, hat und daher wenig wertvoll ist. Die elektrischen Eigenschaften der Cumaronharze sind noch nicht in genügendem Maße festgestellt.

17. Lichtbogenbeständigkeit.

Für die Beständigkeit der Isolierstoffe gegenüber den Einwirkungen des elektrischen Lichtbogens ist erforderlich, daß die Oberfläche des Dielektrikums nach dem Überschlagen der Funken bzw. nach dem Zustandekommen des Flammenbogens isolierend bleibt und keine leitende Brücke bildet. Es ist deshalb aus diesem Grunde nötig, daß die Bindemittel gereinigt werden, damit sie frei von leitenden Beimengungen sind und möglichst nur Stoffe enthalten, die bei dem Eintreten hoher Hitze gasförmig werden, ohne daß dabei elementarer Kohlenstoff entsteht. Bricht der Lichtbogen ab, ist wünschenswert, daß nach dem Erkalten noch eine namhafte Oberflächenisolation vorhanden ist. Anorganische Isolierstoffe, die nur Schwefel als Bindemittel besitzen, sind dem elektrischen Lichtbogen gegenüber sehr widerstandsfähig.

18. Allgemein gültige Richtlinien bei der Herstellung elektrischer Isolierstoffe.

Das im vorhergehenden gekennzeichnete Verfahren, aus fossilem Asphalt, Asbestspinnfasern und Quarzmehl unter Zuhilfenahme von Benzol als Lösungsmittel elektrisches Isoliermaterial herzustellen, läßt sich von einem erfahrenen Isoliertechniker noch vielfach verändern und verbessern, indem z. B. die Auswahl und die Zusammensetzung der Rohstoffe dem jeweiligen Verwendungszweck der Körper besonders angepaßt werden. Die Tabellen, aus denen hervorgeht, wie ungleich sich die Massen elektrisch unter Spannung verhalten, fordern zu weiteren Arbeiten auf.

Bei der Anfertigung aller Isolierstoffe, mögen sie fest oder flüssig, keramischer oder vegetabiler oder beiderlei Natur sein, ist in allen Fällen darauf zu achten, daß weder elektrolytische noch elektroosmotische Kräfte sich geltend machen können. Es ist also technologisch im Prinzip ganz gleichgültig, ob es sich um die Herstellung von Glas oder elektrischem Porzellan, Kabelmassen, Hartgummi, chemisch dargestellten Kunststoffen, Papierprodukten, Asbestpreßlingen, Faserkörpern mit keramischem Gerippe, Lacken, imprägnierten Leinen-, Woll- oder Seidengespinsten, künstlichen Harzen oder sonstigen Dielektrika handelt. Stets ist die Unterbindung der Dissoziationsmöglichkeit und der schädliche Einfluß, welchen die Verschiedenheit der Dielektrizitätskonstanten hervorruft, auszuschalten.

Digitized by Google

Porzellan ist elektrisch um so besser, je weniger Porosität es zeigt, also um so vollkommener die Masse während des Brennens einheitlich zusammengesintert ist. Glas wird nicht durch einen Sinterungsprozeß gewonnen, sondern durch eine Schmelze. Es erklärt sich hieraus, daß infolge der dadurch bedingten Einheitlichkeit der Masse die Durchschlagsfestigkeit des Glases auf höhere Werte gebracht werden kann wie beim Porzellan.

Bei den gewickelten durch Pressung zwischen heißen Walzen hergestellten Papierkörpern, die unter verschiedenen Namen z. B. als Repelit (S. S.W.), Carta (Continentale Isola-Werke), Geax (A. E. G.), Pertinax (Meirowsky), Turbonit (Jaroslaw) u. a. auf dem Markte sind, kommt es sehr auf den isolierenden Klebstoff an, aber auch auf die verwendete Papiersorte. Die Herstellung hat so zu geschehen, daß beim Aufwickeln unter Druck und Hitze oder beim Zusammenpressen in Formen unter Druck und Hitze vermieden wird, daß Luft- und Wasserdampf bei Vereinigung der bestrichenen oder getränkten Lagen mit in den entstehenden Körper hinein gelangen. Besondere Aufmerksamkeit ist der Papierart und der Lage der Fasern zu schenken. Die Fasern sollen senkrecht von den Verschiebungslinien der elektrischen Kraftquelle getroffen werden. Die beim Erhitzen des Bindemittels freiwerdenden Reste des Lösungsmittels müssen vollständig aus dem Isolierstoff heraus.

19. Die Durchschlagsfestigkeit.

Über Methoden zur Prüfung elektrisch isolierender Stoffe, die in Starkstromnetzen Verwendung finden, berichtet H. Schering am Schluß dieses Buches.

Zur Beurteilung der Dielektrika, welche für Hochspannungsanlagen unentbehrlich sind, hat man die elektrische Festigkeit zu bestimmen[1]). Derartige Untersuchungen sind keineswegs so einfach auszuführen, wie es zunächst scheint. Daher stimmen die Angaben der Literatur über die Durchschlagsfestigkeit der Isolierstoffe selbst in weiten Grenzen selten überein. Wird bei den gefundenen Zahlenwerten versäumt anzugeben, was für Elektroden bei der Prüfung verwendet sind, welche Stromart zur Verfügung stand, während welcher Zeiten das Dielektrikum belastet wurde, usw., so sind keine Vergleiche mit dem Verhalten anderer Isolierstoffe zulässig. Sondern sämtliche Versuchsbedingungen müssen bekanntgegeben werden, um eine Charakteristik des zu prüfenden Dielektrikums zu erhalten.

[1]) Schwaiger, A., Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien. Berlin: Julius Springer 1919. Gewecke und Krakowski, Elektrodengröße und Durchschlagsbildung bei der Prüfung dünner Isolierstoffe. Arch. f. Elek. 1918, H. 11. Kinzbrunner, Einfluß der Zeit auf die Durchschlagsspannung. Wiener Zeitschrift 1905, Nr. 38.

Digitized by Google

Ist die eine Elektrode eine Kugel, die andere eine kreisrunde Platte, so stellt man fest, daß das Dielektrikum nicht an der Stelle durchgeschlagen wird, wo sich Kugel und Prüfstoff berühren. Der Durchschlag des Nichtleiters findet um so weiter vom Auflagepunkt der Kugel statt, je größer der Durchmesser derselben ist.

Beobachtet man die Lage der Durchschlagspunkte, so müssen diese in einem Kreise angeordnet sein, wenn das Dielektrikum eine homogene Struktur besitzt. Sind die Durchbruchsstellen des Isolierkörpers wahllos verteilt, kann man daraus schließen, daß kein homogener Aufbau vorhanden ist.

Bei Benutzung von Platten als Elektroden geht der Durchschlag von den abgerundeten Kanten aus, weil hier das elektrische Feld am stärksten ist.

Wenn man sich von der Spannungsverteilung ein Bild machen will, denkt man sich die Oberfläche in nebeneinander liegende Elementarkondensatoren zerlegt. Diese haben dann gegeneinander, gegen die Elektroden und die Zuführungen verschiedene Werte von Kapazität. Das Dielektrikum besteht aus dem zu untersuchenden Isolierstoff und im zuletzt genannten Fall aus der umgebenden Luft.

Da die Homogenität des Feldes gestört ist, so erklärt sich, daß der Durchschlag nicht von der Berührungsstelle der Kugel mit dem Nichtleiter ausgeht, sondern dort stattfindet, wo das Potentialgefälle auf der Oberfläche am größten und daher das Feld im Inneren des Dielektrikums am stärksten ist. Besonders tritt diese Erscheinung bei der Prüfung von Dielektriken namhafter Stärke auf[1]).

Das Kuratorium der Zeitler Studienhaus-Stiftung hat einen Preis ausgesetzt für eine Arbeit, welche die Erforschung des elektrischen Durchschlages von Isolierstoffen zum Gegenstand hat[2]).

20. Untersuchung fester Isolierstoffe mit Mikroskop und Röntgenbestrahlung.

Um festzustellen, wie das Gefüge der isolierenden Preßstoffe beschaffen ist, insbesondere zur Kontrolle der betriebsmäßigen Herstellung, ist die mikroskopische Betrachtung der Oberflächen und Schnitte sehr wertvoll. Man photographiert am besten die mikroskopischen Bilder, da man sie sonst aus dem Gedächtnis verliert.

Es kommen hier zweckmäßig Massenbeobachtungen in Betracht, weil Erfahrung nötig ist, und durch vergleichende Bilder erst der wahre Charakter des Materials ermittelt werden kann. Durch nacheinander erfolgende Anwendung von Lösungsmitteln der einzelnen

[1]) Schwaiger, A., Theoretisches zur elektrischen Festigkeitsuntersuchung. Mitteilungen des Staatlichen Techn. Versuchsamtes Wien IX, Jahrg. 1920, Heft 2/4.

[2]) Inzwischen K. W. Wagner zuerkannt.

Digitized by Google

Bestandteile des Isolierstoffs lassen sich für die optische Betrachtung bestimmte Teile freilegen.

Diese mikrophotographischen Feststellungen klären sehr oft Fehlerhaftigkeiten in der Herstellungsweise auf. So kann man ungleichmäßige Lagen, Porosität, schlechte Mischungsverhältnisse, unzweckmäßige Materialverteilung u. dgl. auf diese Weise herausfinden.

Da man nach dieser Methode aber nur das Gefüge der äußersten Schicht der Nichtleiter kennen lernt, nicht aber das Innere des Körpers, so wurden Untersuchungen mit Röntgenstrahlen vorgenommen[1]). Dabei kam im vorliegenden Fall eine sogenannte Radio-Silex-Röntgeneinrichtung, Fabrikat der

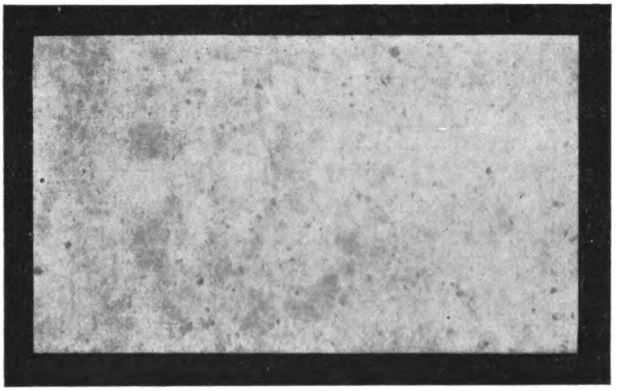


Abb. 3. Weichmasse.

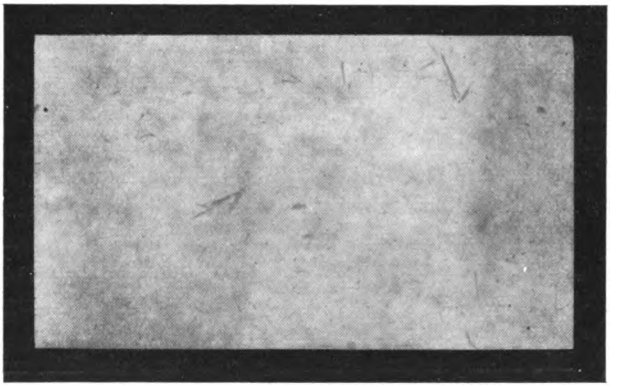


Abb. 4. Feuchtigkeit annehmendes Material.

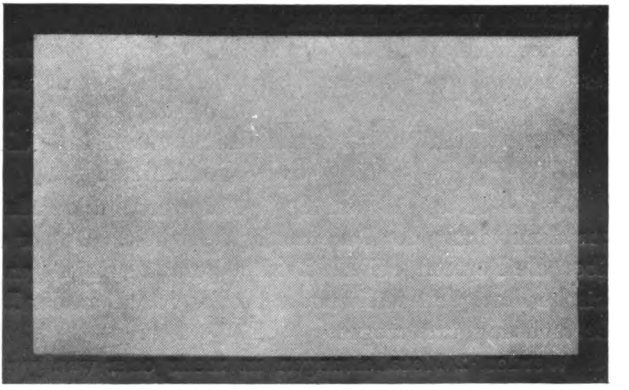


Abb. 5. Feuer- und wärmesicheres Isoliermaterial gemäß den V. D. E.-Vorschriften.

[1]) Bültemann, A., Helios 1921, Nr. 35, S. 415.

Digitized by Google

Koch & Sterzel A.-G., zur Anwendung, welche mit einer Lilienfeld-Röntgenröhre ausgerüstet war.

Die von der Spannung abhängige Härte der Strahlen sowie die hier sehr hohe Strahlenintensität können von der Schalttafel aus eingestellt werden, und zwar beide unabhängig voneinander. Man projiziert die Schattenbilder auf einen Fluoreszenzschirm oder auf die photographische Platte, wobei die Strahlenhärte, also die Durchdringungsfähigkeit, sowie die Intensität der Bestrahlung den Bestandteilen des Dielektrikums und der Dicke desselben angepaßt werden.

Die Fehler im Innern gelangen durch dieses Verfahren des Absuchens zum Vorschein. In Fig. 3 ist das Röntgenbild einer für Starkstromanlagen unzulässigen »Weichmasse« veranschaulicht, also eines Materials, das nach einem auf Seite 168 beschriebenen Verfahren hergestellt wurde mit einer Erweichungsgrenze, welche bei ungefähr 60 bis 80 Grad liegt. Die Ungleichmäßigkeiten kommen deutlich zum Ausdruck.

Ein Körper, der im trockenen Zustand eine gewisse Durchschlagsfestigkeit besitzt, auch Wärmebeständigkeit aufweist, aber in feuchten Räumen Wasser annimmt und daher ebenfalls in Starkstromanlagen nicht verwendbar ist, wird charakterisiert durch die Röntgenaufnahme in Fig. 4. Asbestfasern und wasserhaltige Schichten sind erkennbar.

Fig. 5 veranschaulicht die Röntgenaufnahme eines feuer- und wärmesicheren Materials von guter Durchschlagsfestigkeit und Feuerbeständigkeit. (Fermit III, siehe Seite 204.) Ungleichmäßigkeiten im Aufbau sind hier nicht wahrzunehmen.

Die Röntgendurchleuchtung gibt uns ein Hilfsmittel an die Hand, um in elektrischen Isolierstoffen fehlerhafte Stellen nachzuweisen. Die Prüfmethoden lassen sich noch nach verschiedenen Richtungen hin wesentlich vervollkommnen.

Die Adern und Einschlüsse in Gesteinsplatten (Marmor und Schiefer) lassen sich ebenfalls durch Röntgenuntersuchungen herausfinden.

21. Einfluß der Elektrodenformen auf die Zerstörung der Nichtleiter.

In Abschnitt 19 auf Seite 182 wurde über Methoden gesprochen zur Ermittelung der Durchschlagsfestigkeit. Es war dort bereits einiges über die Formen der Elektroden gesagt. Im folgenden wird die elektrische Festigkeit isolierender Stoffe, vor allem der Luft, einer weiteren Betrachtung unterzogen.

Werden 2 Metalleitungen in mehr oder weniger großer Entfernung parallel zueinander geführt und mit Wechselstrom beschickt, so gelangt man bei ansteigender Spannung zu einem Punkt, wo die Drähte anfangen, an ihrer Oberfläche leuchtende Erscheinungen zu zeigen.

Digitized by Google

Wird die angelegte Spannung noch weiter erhöht, vermehrt sich das Glimmen. Man bezeichnet diese Zustände als Koronaerscheinungen. Sie sind mehrfach zum Gegenstand von Untersuchungen gemacht, weil die Koronaverluste auf Freileitungen Werte annehmen können, welche zur Unrentabilität der Stromübertragung führen[1]).

Bei Freileitungen ist Luft der Isolierstoff, die Elektroden sind die strom- und spannungführenden Metalldrähte. Man kann die Luft als ein gutes Dielektrikum betrachten, ihre Leitfähigkeit ist nur äußerst gering. Vor allem hat Luft, verglichen mit den elektrisch isolierenden Preßstoffen, wie sie hier behandelt wurden, den Vorzug, daß sie in ihrem Gefüge vollkommen gleichmäßig ist. Dann ist noch der günstige Umstand zu beachten, daß der Isolierstoff Luft die stromführenden Teile, also die Drähte, eng umschließt, während z. B. bei Aufmontierung von Klemmen auf feste Isolierkörper immer mit ungleichmäßigem Anliegen des leitenden Metalles an das Dielektrikum zu rechnen ist.

Durch die parallel laufenden Leitungen geladener Drähte von kreisrundem Querschnitt, wie sie üblich sind, entsteht aber kein homogenes Feld. Nur in einem homogenen Felde, also bei parallelen Platten als Elektroden, kann man die in einem gleichförmigen Dielektrikum vorhandene Feldstärke praktisch überall als gleich betrachten. Man mißt hier die senkrechte Entfernung zwischen den Platten in cm und dividiert die Netzspannung in Volt durch erstere.

Bei nichtebenen Elektroden, z. B. wie hier bei Drähten, die eine zylindrische Form haben, entsteht ein inhomogenes Feld, in welchem sich die elektrische Feldstärke V/cm von Ort zu Ort ändert und stark abnimmt, wenn die Entfernung von den Drähten wächst. Haben wir es mit zwei absolut glatten, blankpolierten, überall gleich kreisrunden, parallel zueinander verlaufenden geladenen Metalldrähten zu tun, so berechnet sich die an der Drahtoberfläche herrschende elektrische Feldstärke nach folgender Formel:

$$\text{Feldstärke V/cm} = \frac{P}{2r \cdot \ln \frac{D}{r}}.$$

Hierin ist P die Netzspannung in Volt, r der Radius der Leitungsdrähte in cm und D die Entfernung der Drahtmitten voneinander, ebenfalls in cm.

Wird zwischen zwei solchen Leitungen in Luft die Spannung so groß, daß sich Glimmerscheinungen an den Drähten zeigen, beginnt das Dielektrikum, die Luft, durch die Wirkung der elektrischen Kräfte

[1]) Görges, H., Weidig, P., Jaensch, A., Über Versuche zur Bestimmung der Koronaverluste auf Freileitungen. ETZ. 1911, Heft 43.

Weidig, P. und Jaensch, A., Koronaerscheinungen an Leitungen. ETZ. 1913, Heft 23 und 24.

Digitized by Google

zerstört zu werden. Dabei tritt Stromverbrauch auf. Es bilden sich chemische Veränderungen in der Luft, wobei u. a. Ozon entsteht. Ferner wird Wärme frei.

Denken wir uns an Stelle der Luft als isolierendes Mittel einen Preßkörper, so läßt sich, wenn Drähte in denselben eingepreßt sind, der Wert der elektrischen Feldstärke an der Oberfläche der Drähte rechnerisch feststellen, falls die Dielektrizitätskonstante des Isolierstoffs bekannt ist.

Es ist aber nicht anzunehmen, daß die den Preßling zerstörenden Erscheinungen bei der gleichen Spannung wie in Luft auftreten, sondern hier spricht die chemische Zusammensetzung der isolierenden Masse mit. Es kommt darauf an, welchen Widerstand der Isolierkörper gegen das Bestreben der elektrischen Kraft, ihn zu dissoziieren, besitzt, und wie die Aufbaustoffe des Isolierkörpers der elektroosmotischen Betätigungsweise entgegenarbeiten.

Werden in der Technik auf isolierendem Preßmaterial Anschlußleiter montiert, entsteht in den seltensten Fällen ein homogenes Feld eigentlich überhaupt nicht. Es ist in Betracht zu ziehen, daß die Metallteile nie ohne scharfe Ecken, Schrammen und Spitzen sind, die sofort eine unter Umständen sehr stark erhöhte Felddichte hervorrufen. Selbst die gezogenen kreisrunden Leitungsdrähte der Netze besitzen Stellen, die infolge mechanischer Fehler vergrößerte Spannungsbelastungen zur Folge haben, indem die Glimmentladungen an diesen rauhen Stellen wesentlich eher auftreten als an glatten. Auch Regen, Ruß, Schnee, Staub u. dgl. vermehren die Gefahr frühzeitiger Zerstörung des Dielektrikums.

Wie aus dem Auftreten von Koronaverlusten in der Luft und auch aus der vorher genannten Formel zur Berechnung der Feldstärken bei zylindrischen Elektroden hervorgeht, ist das Dielektrikum in inhomogenen Feldern dicht am Leiter am meisten beansprucht. Dieser Erscheinung hat man auch bei Verwendung von festen Dielektriken Beachtung zu schenken. Man darf daher nicht einen beim Prüfen im homogenen Felde gefundenen Wert von gerade ausreichender Spannungsfestigkeit der anzuwendenden Materialdicke zugrunde legen, sondern man hat aus den vorher genannten Gründen mit einer stellenweise stärkeren Belastung des Isolierstoffs zu rechnen.

Wenn bei dem Auftreten einer Glimmhülle an Drähten dieser Zeitpunkt als der Beginn der Zerstörung des Isoliermittels Luft angesehen wird, also der als Anfangsspannung bezeichnete Wert, so ist dies natürlich nur bedingt richtig. Denn die Zersetzung der Luft hat längst vorher, wenn auch nur in geringem Maße, eingesetzt, ehe unser Auge das Glimmen wahrnehmen kann.

Die Form der Elektroden hat wegen der Gestaltung des elektri-

Digitized by Google

schen Feldes für die Belastung des Isolierstoffs wesentliche Bedeutung. Mit größerem Durchmesser der zylindrischen Drahtleitungen nehmen die Zerstörungserscheinungen im Dielektrikum Luft bedeutend ab. Man kann die Grenzen experimentell und rechnerisch mit guter Übereinstimmung ermitteln.

Der Einfluß der Elektrodenform auf feste Isolierkörper ist natürlich in demselben Maße vorhanden wie in Luft. Zu beachten ist, daß bei Leitungsanschlüssen, die auf isolierenden Unterlagen befestigt werden, die isolierende Schicht in vielen Fällen aus Isolierstoff und aus Luft besteht, indem weiterhin die Oberflächenleitung mit in Erscheinung tritt.

Zwischen montiertem Metall und festem Dielektrikum sind minimale, aber dielektrisch wirksame, dünne Luftschichten unvermeidlich. Wie wir gesehen haben, wächst infolge Spitzenwirkung die Felddichte stark an. Es bildet sich deshalb gern in der Nähe der Metalleiter Glimmlicht, dabei wird die Luft ozonisiert, und die Oberfläche der festen Isolierkörper wird angegriffen.

Oft leitet dieser Vorgang die Vernichtung des ganzen Isolierstoffs ein. Die bei Zerstörung des Dielektrikums, also beim Losreißen der Elektronen vom Molekül freiwerdende Wärme bringt die Bindemittel der Preßstoffe zum Erweichen. Gut einheitliche, hoch schmelzbare Bindemittel widerstehen natürlich einer erhöhten Felddichte am wirksamsten.

Beim Auftreten von Koronaerscheinungen spielt der atmosphärische Druck eine Rolle, indem die Verluste bei erhöhtem Luftdruck vermindert werden. Dies ist erklärlich aus den Angaben, die früher über die elektrische Festigkeit von Gasen bei Kompression gemacht sind.

Für feste Isolierstoffe, wie für gasförmige natürlich auch, wird mit Erhöhung der Temperatur die Zerstörung des Dielektrikums beschleunigt.

Es gibt Materialien, die für sehr niedrige Spannungen verwendet werden und deren Durchschlagsfestigkeit und Isoliervermögen bei der Erwärmung ansteigt. Dies scheint der eben genannten Gesetzmäßigkeit zu widersprechen. Es liegt hier aber in bezug auf die Bewertung als elektrischer Isolierstoff insofern eine irreführende Erscheinung vor, als solche Massen wie z. B. Asbest-Zement, Gips u. a. gar keine richtigen Dielektrika sind, sondern Halbleiter. Sie haben eine poröse, stark Wasser ansaugende Struktur und sind Körper, bei denen mit Entfernung der Feuchtigkeit durch Erwärmung vorübergehend eine gewisse mäßige Isolierfähigkeit erzielt wird. Mit Spannung führenden Teilen von Starkstromanlagen dürfen solche Materialien nicht in Berührung kommen. Auch bei Verwendung in Schwachstromanlagen ist keine elektrische Festigkeit vorhanden, wenn die Zuführungsleiter infolge scharfer Stellen eine vergrößerte Felddichte herbeiführen.

Über den Vorgang, wie das Glimmen von der Drahtoberfläche der Leitungen aus zustande kommt, hat Thomsen eine Erklärung ge-

Digitized by Google

geben. Er stellt sich vor, daß die Luft nur ganz wenig ionisiert ist. Mit steigendem Anwachsen der elektrischen Felddichte wirkt die elektrische Kraft derart auf die zunächst vorhandenen wenigen Ionen ein, daß diese gegen die Moleküle geschleudert werden und sie durch diese Stöße dissoziieren. Die neugebildeten Ionen beteiligen sich an der Stoßwirkung, und die Dissoziierung geht lawinenartig vonstatten. Erhöhte Felddichte und ein hinreichend großer Raum zwischen den Drähten fördern die Stromleitung in der Luft.

Die Thomsonsche Theorie ist ein Bild, das für Gase bestimmt ist. Man kann die Einwirkung elektrischer Kräfte auf ein festes Dielektrikum nicht ohne weiteres mit den Erscheinungen vergleichen, wie sie in Luft auftreten. Die Zerstörung fester Isolierstoffe wird aber um so eher aus Material-Konstanten erkenntlich sein, je gleichmäßiger das isolierende Stoffgebilde ist, aus welchem das Dielektrikum besteht. Zweifellos sind die Vorgänge der elektrischen Vernichtung fester Nichtleiter wesentlich komplizierter wie in Gasen.

22. Der Durchschlag der Luft mit Wechselstrom von 50 Per/sek.

Um Aufschlüsse zu erhalten, in welcher Weise die elektrische Festigkeit der Luft durch die Einwirkung von Wechselstrom vernichtet wird, wurden Funkenstrecken mit der Ernemannschen Zeitlupe beobachtet[1]). Diese Untersuchungen fanden statt im Hochspannungslaboratorium der Porzellanfabrik H. Schomburg & Söhne A.-G. in Margaretenhütte. Zur Verfügung stand sinusförmiger Wechselstrom von 50 Per/sek, die Leistung des Transformators betrug 200 kW.

Die Versuchsanordnung war so getroffen, daß der Stromübergang zwischen Zinkkugeln verschiedener Größe vor sich ging, welche auf bestimmte Entfernungen voneinander einstellbar waren. Die Zeitlupe[2]) ist ein Apparat, mit welchem sich bis zu 600 Aufnahmen in der Sekunde herstellen lassen. Mittels einer schnell drehbaren Walze mit Spiegelanordnung werden die Bilder auf einem beweglichen Film hervorgerufen.

Der wichtigste Isolierstoff, die Luft, ist ein mechanisches Gemenge von rund 23 Gewichtsprozenten Sauerstoff und 77 Gewichtsprozenten Stickstoff. Außerdem sind stets Spuren der Gase Argon, Metargon, Krypton, Xenon, Helium vorhanden, sowie Kohlensäure, Ammoniak, Schwefelwasserstoff u. a., außerdem Wasserdampf. Untersuchungen der elektrischen Festigkeit der Luft wurden vielfach vorgenommen,

[1]) Bültemann, A., Untersuchungen von Wechselstrom-Funkenstrecken mittels Zeitlupe. Elektrotechn. Umschau 1921, H. 22. u. 23.

[2]) Lehmann, Dr. H., Über neue kinematographische Theorien und Apparate. Photograph. Korrespondenz, Juli 1916.

Digitized by Google

so besitzen wir außer den vorher bekannt gegebenen Forschungen von Görges, Weidig und Jaensch noch wertvolle Arbeiten von Petersen[1]) und Estorff[2]), neuerdings eine zusammenfassende Darstellung von W. O. Schumann[3]).

Bei den Untersuchungen im Schomburger Laboratorium wurden Strom- und Spannungskurven nach Siemens-Blondel ermittelt und die Zeitlupenbilder hiermit verglichen. Die Einzelheiten der vielen unter den verschiedensten Bedingungen angestellten Versuche sollen nicht aufgeführt werden, es seien nur die Hauptergebnisse mitgeteilt.

Die Helligkeit der Funkenbilder richtet sich nach der Größe der Amplitude, welche die Spannungskurve zeigt. Daher läßt sich bei 100 Wechseln in der Sekunde und bei 500 Bildern in der Sekunde die Periode in 5 Teile zerlegen. Es ergeben sich daher Helligkeiten der Funkenbilder, welche der jeweiligen Spannung ent-

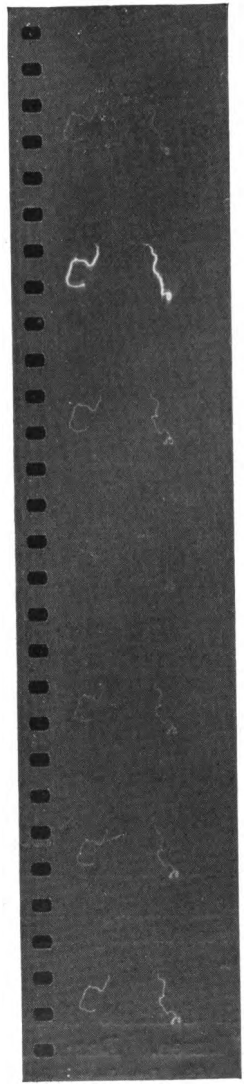


Abb. 6. Funkenstreckenbilder, $^1/_{500}$ Sek. Beginn der Entladung

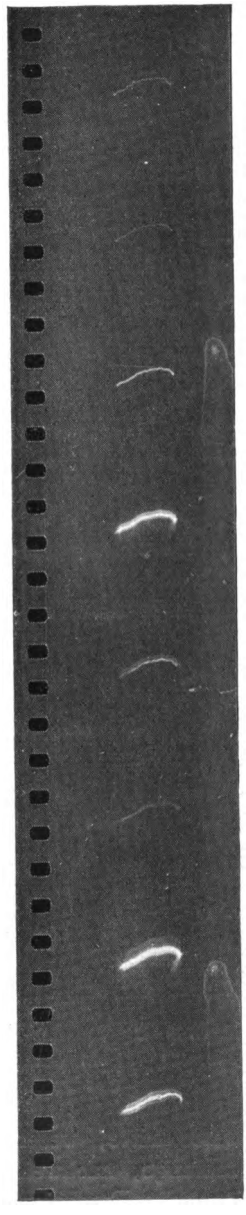


Abb. 7. Weitere Ausbreitung des Flammbogens.

[1]) W. Petersen, Hochspannungstechnik.

[2]) Estorff, W., Beiträge zur Kenntnis der Kugelfunkenstrecke. Diss. Berlin 1915.

[3]) Schumann, W. O., Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung. Berlin: Julius Springer 1923.

Derselbe, Die elektrische Festigkeit der Luft zwischen plattenförmigen Elektroden. Arch. f. Elek. 1923, Heft 5.

Digitized by Google

sprechen. So verschwindet das Bild, wenn die Spannungskurve durch den Nullpunkt geht. Es handelt sich hier um Funkenstrecken, welche bei rund 200 mm Abstand der Kugelelektroden unter 250 kV. eff. Spannung entstehen. Das Feld ist also kein homogenes.

In Abb. 6 ist ein Stück Film abgebildet, aus dem ersichtlich ist, daß die mit Wechselstrom von 50 Perioden hervorgerufenen Funkenstrecken durch Hochfrequenzphotographie in ihre Einzelbestandteile auflösbar sind. Die Änderung der Lichtintensität tritt besser und schärfer hervor, wenn die Filme mit dem Projektionsapparat vorgeführt werden. Breitet sich der Lichtbogen mit der Zeit aus, so entstehen Bilder, wie sie Abb. 7 zeigt.

Charakteristisch sind vor allem der erste Überschlag des Funkens und das Abreißen desselben. In Abb. 8 ist der Beginn der Entladung dargestellt, das Filmbild ist 4mal vergrößert. Man sieht die Leuchtschlange, welche umgeben ist von einer Lichthülle, begrenzt durch eine hellere Linie, und weiter noch von einer zweiten Lichthülle, ebenfalls von einer helleren Linie eingeschlossen. In manchen Fällen hat sich noch

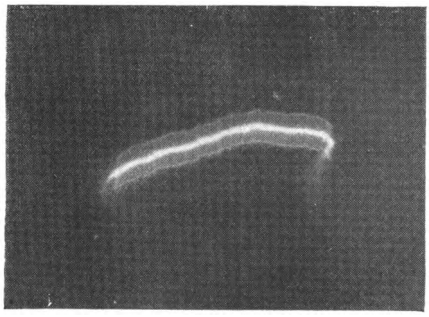


Abb. 8. Beginn der Funkenentladung. Dauer $^1/_{500}$ Sek. 4 malige Vergrößerung des Filmbildes.

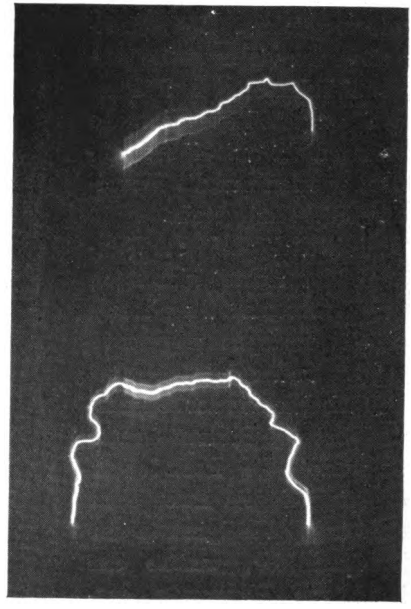


Abb. 9. Flammbogenbilder, 500 je Sek. Abreißen des Lichtbogens. 4 malige Vergrößerung des Filmbildes.

eine dritte, wesentlich dunklere Zone, auch parallel zur Leuchtschlange, nachweisen lassen. Das Abreißen der Funken zeigt eine ähnliche Erscheinung. Sie ist in Abb. 9 zum Ausdruck gebracht.

Es wurden auch Funkenüberschläge an Hängeketten von Kugelkopfisolatoren nach Scheid[1]) und Hewlett-Isolatoren, trocken und naß, mit der Zeitlupe beobachtet. Die Periode wird wie vorher auf-

[1]) Ein neuer Hängeisolator. ETZ. 1921, S. 1323.

Digitized by Google

gelöst in dunkle und helle Leuchterscheinungen. Beginn und Ende des Flammbogens zeigen wieder die eigenartigen Zonen.

Als eine Erklärung für die Zonen kann man das Nachströmen der Elektrizität ansehen, außerdem sind Schwingungserscheinungen wahrscheinlich, wenn sie auch nur in geringem Maße beteiligt sind. Die Vorgänge erscheinen höchst verwickelt. Man hat dabei die Wirkungsweise des Transformators, die Temperaturen der glühenden Gase und Metalle bzw. deren Widerstände und verschiedenes andere einzusetzen. Annehmen läßt sich, daß der Initialfunke, welchem das dauernde Nachströmen der Elektrizität folgt, mit einer Stromstärke von 1000 bis 1500 Amp. übergeht. Die Zeitdauer dieses Funkens von 200 mm Länge beträgt höchstens den milliontel Teil einer Sekunde.

Praktischen Wert wird es haben, mit der Zeitlupe die Entladungen beim Momentschalten und die Entwickelung wie die Ausbreitung des Lichtbogens in Ölschaltern festzustellen.

23. Die Herstellung fester wärmebeständiger Isolierstoffe mittels Holzöls.

Bisher wurden als geeignete isolierende Bindemittel zur Herstellung von Asbestpreßkörpern Harze und Asphalt genannt. Gekennzeichnet war schon, daß es für sehr viele Verwendungszwecke unbedingt erforderlich ist, eine gut wärmebeständige und dabei in ihren elektrischen Eigenschaften durch Feuchtigkeit nicht beeinflußbare Masse zu erzielen.

Dies gelingt, indem man Asbestfasern und Mineralpulver mit sogenanntem Holzöl verarbeitet. Es ist dies eine meistens aus China stammende, aus harzhaltigen Baumarten gewonnene braune, harzige, stark fluoreszierende Flüssigkeit, welche beim Erwärmen durch einen Oxydationsprozeß unter Wasserabspaltung erhärtet und hitzebeständig wird.

Die mit Holzöl behandelten, in die gewünschte Form gepreßten Isoliergegenstände bringt man in den Heizschrank und läßt dort den Erhärtungsvorgang vollziehen.

Dielektrika, welche mit Hilfe von Holzöl hergestellt sind, erkennt man leicht daran, daß sie in der Flamme einen an Kopaivbalsam erinnernden Geruch ausströmen.

Die Erfahrung hat gelehrt, daß es zweckmäßig ist, die Fabrikation solcher Dielektrika durch geeignete Zusätze zu unterstützen.

Infolge des hohen Preises, welchen man für brauchbares Holzöl anzulegen hat, sind der Herstellung derartiger Isolierstoffe, die elektrisch und mechanisch gut sind, jedoch Schranken gesetzt.

24. Die Kondensationsharze.

Neuerdings ist es gelungen, auf synthetische Weise elektrisch isolierende Harze zu gewinnen, welche hoch wärmebeständig sind, durch

Digitized by Google

Feuchtigkeit nicht beeinflußt werden und sich in den üblichen Lösungsmitteln nicht auflösen.

Es sind dies die sogenannten Kondensationsharze. Sie entstehen durch die Vereinigung von Phenolen und Aldehyden. Diese Harze sind berufen, bei der Herstellung von Preßmaterialien für elektrische Isolierzwecke und auch sonst für die Anfertigung hochwertiger Dielektrika sich eine von Tag zu Tag steigernde Bedeutung zu erobern.

Bereits im Jahre 1872 hatten der Chemiker Adolf Baeyer, und ebenso Kleeberg im Jahre 1891, festgestellt, daß Phenole und Aldehyde unter Bildung von harzartigen Massen aufeinander wirken. Es war ihnen aber nicht gelungen, einen hornartigen Körper zu isolieren. Sie ließen daher ihre Arbeiten technisch unvollendet. Im Jahre 1899 stellten Arthur Smith unter Verwendung von Methylalkohol ($CH_3 \cdot OH$) harzartige Massen aus Formaldehyd und Phenolen her und 1902 Adolf Luft unter Verwendung einer Säure und Glyzerin bzw. Kampfer.

Ein praktisch verwertbares Kunstharz hergestellt zu haben, blieb jedoch dem Amerikaner Dr. L. H. Baekeland in Jonkers, New York, vorbehalten.

25. Das Kunstharz Bakelit.

Baekeland hat seine Untersuchungen mit seltener Zähigkeit verfolgt und durch jahrelange äußerst mühselige Forschungen es so weit gebracht, daß es jetzt möglich ist, fabrikatorisch hochwärmefeste isolierende Harze zustande zu bringen, welche unter dem geschützten Namen „Bakelit“[1]) auch in Deutschland im Handel zu haben sind.

Die alleinige Verwertung der Baekelandschen Patente in Deutschland ruht in den Händen der Bakelite G. m. b. H. in Berlin W. 35.

In Amerika sind Besitzer der Patentrechte die General Bakelite Co. in New York.

26. Die Phenole.

Das Phenol oder Benzophenol ($C_6H_5 \cdot OH$) ist ein farbloser kristallinischer Körper, der bei 41° C schmilzt und bei 184° C siedet. Er hat ein spezifisches Gewicht von 1,084. Läßt man Phenol, welches auch als Karbolsäure bezeichnet wird, obwohl es keine richtige Säure ist, an der Luft liegen, entsteht eine schwache Rotfärbung. Ganz reines Phenol kristallisiert in farblosen Prismen. In 15 Teilen Wasser von 20° löst sich Phenol auf, in Alkohol ($C_2H_5 \cdot OH$), Äther ($C_2H_5 \cdot O \cdot C_2H_5$) und Eisessig ($CH_3 \cdot COOH$) ist es leicht löslich. Destilliert man eine wässerige Phenollösung, so geht es mit den Dämpfen in das Destillat über. Mit Alkalien entstehen die Phenolate, z. B. Phenolkalium ($C_6H_5 \cdot OK$). Phenol schmeckt brennend, es wirkt giftig und

[1]) Bültemann, A., Über elektrische Isolierstoffe, insbesondere Bakelitmaterial. Helios 1921, Nr. 34, S. 401 u. Nr. 35, S. 413.

Digitized by Google

wurde besonders früher viel als Antiseptikum verwendet. Industriell gewinnt man es im größten Maßstabe aus dem Teer.

An Stelle von Phenol können auch Kresole, Oxytoluol ($C_6H_4 \cdot CH_3 \cdot OH$), benutzt werden, welche bei 188°—204° sieden, oder auch α-Naphtol ($C_{10}H_7 \cdot \alpha\text{-OH}$), ein Oxyderivat des Naphtalins ($C_{10}H_8$), welches sich durch Kondensation zweier Benzolkerne bildet. Die Hydroxylgruppe in α-Naphtol ist leichter beweglich wie diejenige in Phenol. Der Schmelzpunkt liegt bei 94°, der Siedepunkt bei 280°. Es kristallisiert in Nadeln, riecht wie Karbolsäure und ist in heißem Wasser schwer, in Alkohol leicht löslich.

27. Die Aldehyde.

Die Aldehyde — der Name ist entstanden aus der Liebig'schen Bezeichnung Al(kohol)dehyd(rogenatus) — enthalten die „Aldehyd" genannte Gruppe — $C\langle^{O}_{H}$ welche mit Alkylen, einwertigen Kohlenwasserstoffresten wie Methyl, Äthyl usw. und einem Wasserstoffatom in Reaktion getreten sind, z. B. $CH_3 \cdot COH$. Durch Addition von Wasserstoff gehen die Aldehyde in primäre Alkohole über:

$$CH_3\,COH + 2H = CH_3 \cdot CH_2 \cdot OH \text{ (Äthylalkohol).}$$

Zur Herstellung der synthetischen Kondensationsharze verwendet man vorzugsweise Formaldehyd $H \cdot COH$, welches in 40%iger wässeriger Lösung in den Handel gelangt. Es ist bei Zimmertemperatur gasförmig und läßt sich durch starke Abkühlung in eine Flüssigkeit überführen, die bei minus 21° siedet. Formaldehyd besitzt einen stechenden Geruch und tötet Bakterien. Als Desinfektionsmittel sind Fomaldehyd enthaltende Stoffe unter dem Namen Formalin bekannt. Leitet man Methylalkohol ($CH_3 \cdot OH$) mit Luft über glühende Platindrähte, so bildet sich Formaldehyd. Technisch wird Formaldehyd bei der Holzdestillation erzeugt.

Statt Formaldehyd lassen sich auch dessen Verwandtschaften Trioxymethylen ($H \cdot COH)_3$, ein fester Körper, verwenden und Hexamethylentetramin oder Formin, $(CH_2)_6 \cdot N_4$, ebenso Azetaldehyd $CH_3 \cdot COH$ und Benzaldehyd $C_6H_5 \cdot COH$. Die Auswahl ist zum Teil eine Preisfrage.

28. Die Herstellung von Bakelit.

Von einer eingehenden Behandlung der Literatur über die Forschungsergebnisse der Reaktionen zwischen Phenolen und Aldehyden soll hier abgesehen werden. Es haben eine ganze Reihe Chemiker dieses Gebiet bearbeitet, eine bedeutende Menge von Veröffentlichungen sowie eine große Anzahl von deutschen, amerikanischen, englischen und französischen Patentschriften liegen vor. Auch eine Aussprache über die Konstitution der synthetischen Phenolharze soll hier nicht stattfinden.

Digitized by Google

Jedoch ist wissenswert, die Gründe zu kennen, weshalb die Herstellung technisch brauchbarer Kondensationsharze auf außerordentliche, mitunter fast unüberwindlich erscheinende Schwierigkeiten stieß.

Nämlich es kommt sehr darauf an, in welchen Mengenverhältnissen die Ausgangsstoffe angewendet werden. Es bilden sich dabei je nachdem kristallinische oder amorphe oder harzartige Körper. Sie lassen sich teilweise überhaupt nicht isolieren. Bei diesen äußerst komplizierten Reaktionen entstehen Stoffe von sehr verschiedener Löslichkeit in den bekannten Lösungsmitteln wie Alkohol, Azeton ($CH_3 \cdot CO \cdot CH_3$), Äther, Essigsäure usw. Manche sind sogar wasserlöslich, andere in jedem Lösungsmittel unlöslich. Teils sind sie schmelzbar, teils unschmelzbar. Die Zusammensetzung der Endprodukte ist chemisch ganz verschieden, die physikalischen Eigenschaften der Körper weichen stark voneinander ab.

Um die Einwirkung von Phenolen auf Aldehyde herbeizuführen, bedient man sich eines sogenannten Kontaktmittels oder Katalysators, d. h. einer Substanz, die nicht an der Reaktion teilzunehmen braucht, dieselbe aber einleitet oder beschleunigt. Bei der Herstellung der Kondensationsharze hat man die mannigfachsten Kontaktmittel versucht, wie Säuren, Basen, Salze, organische Lösungsmittel. Es hat sich herausgestellt, daß die Wahl des Katalysators von großem Einfluß auf das entstehende Endprodukt ist.

Es läßt sich übersehen, daß auf diese Weise eine Unzahl von verschiedenartigen Stoffen darstellbar ist.

Läßt man z. B. Phenol mit Formaldehydlösung aufeinander wirken unter Benutzung starker Salzsäure als Kontaktsubstanz, so tritt Eigenerwärmung ein, und es bildet sich eine harte, nicht einheitliche, Masse, die unschmelzbar ist und sich in keinem Lösungsmittel löst. Dieses harzartige Produkt hat u. a. den großen Nachteil, daß es außerordentlich porös ist. Denn durch die Wirkung der Salzsäure haben sich beim Erhitzen Gase gebildet, welche die Porosität hervorrufen.

Behandelt man überschüssiges Phenol mit Formaldehyd in saurer Lösung unter Erwärmen, so gelangt man zu schellackartigen Körpern, welche Baekeland als „Novolack" bezeichnet hat. Sie sind schwer schmelzbar, in Alkohol löslich und gleichen den „Saliretinen", die man bei der Kondensation von Phenolalkohol in saurer Lösung erhält. Novolack ist von Bakelit verschieden.

Nach dem Verfahren, wie es Baekeland schließlich technisch verwendbar gestaltete, wird als Kontaktsubstanz ein alkalisches Mittel angewendet. Der Katalysator wird nur in geringer Menge zugesetzt. Bei Gewinnung des Endproduktes pflegt er sich wieder abzuscheiden. So tritt bei Benutzung von Ammoniak dieses später wieder aus.

Digitized by Google

Der Kondensationsprozeß wird in drei verschiedenen nacheinander verlaufenden und ineinander über gehenden Stufen vorgenommen.

Dabei entsteht zunächst das Bakelit A, eine bei gewöhnlicher Temperatur flüssige, klebrige und zähe Masse, oder auch ein schon fester, ziemlich spröder Körper, welcher in Phenol ($C_6H_5 \cdot OH$), Alkohol ($C_2H_5 \cdot OH$), Azeton ($CH_3 \cdot CO \cdot CH_3$), Natronlauge, Glyzerin ($CH_2 \cdot OH \cdot CH \cdot OH \cdot CH_2 \cdot OH$) und ähnlichen Lösungsmitteln löslich ist. Es ist beachtenswert, daß sich das feste Bakelit A als eine schmelzbare Masse erweist.

Setzt man flüssiges oder festes Bakelit A einer längeren Erhitzung aus, so entsteht als zweite Modifikation das Bakelit B, ein Zwischenprodukt, welches fest ist und in der Wärme plastische Eigenschaften besitzt, dann gummiartig und elastisch wird. Beim Abkühlen wird es wieder hart und spröde. Es läßt sich aber nicht mehr schmelzen. In den vorher genannten Lösungsmitteln ist Bakelit B nicht mehr löslich. Dagegen kann man es in Azeton, Phenol und Terpentinöl aufquellen. Unter Druck läßt es sich in einer heißen Form zu einem einheitlichen zusammenhängenden Klotz verpressen.

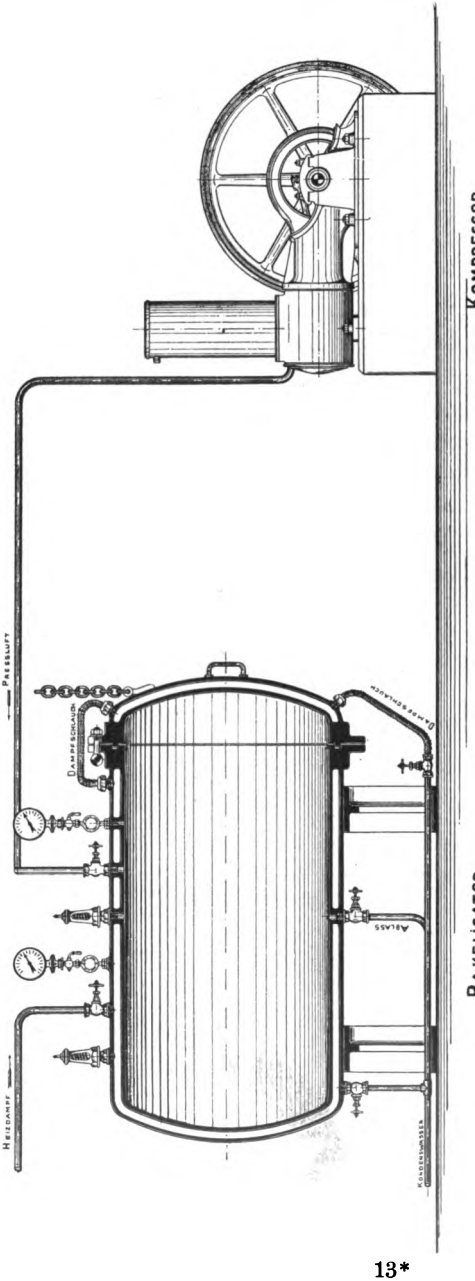


Abb. 10. Bakelisator mit Kompressor.

Digitized by Google

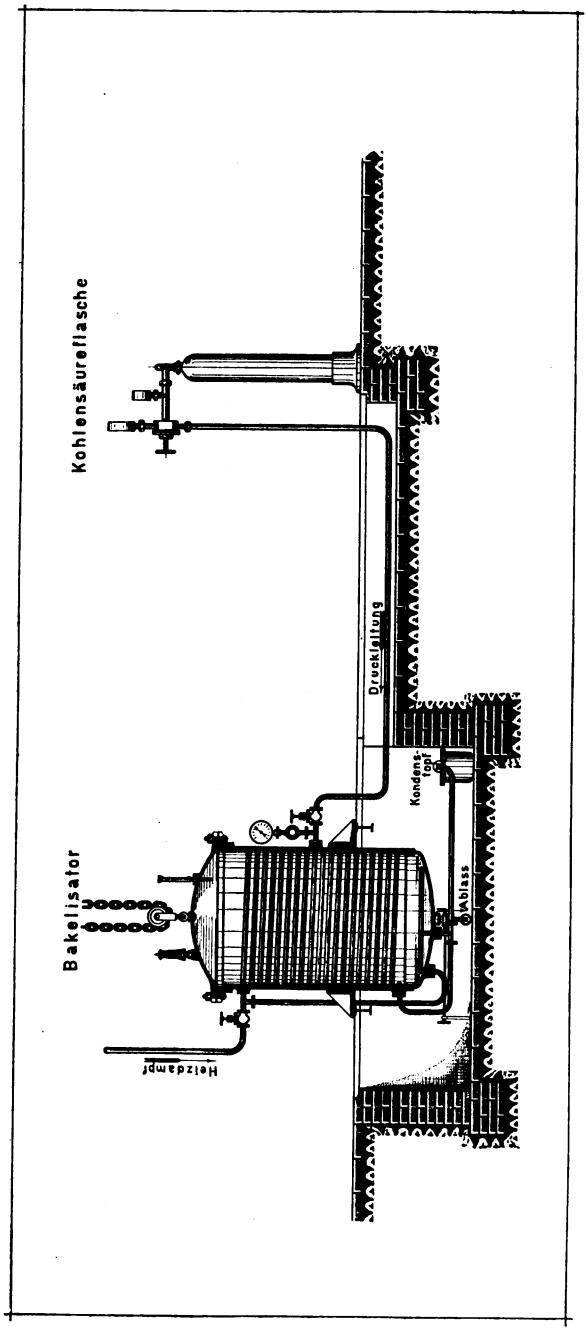


Abb. 11. Bakelisator mit Kohlensäureflasche.

Wendet man auf Bakelit B weiterhin Wärme an, so entsteht die dritte Modifikation, das Endprodukt Bakelit C. Diese Reaktion darf man aber nicht bei gewöhnlichem Atmosphärendruck vornehmen, weil im Inneren der Masse Gase entstehen, und dann ein poröses und blasiges Endprodukt zustande käme, sondern dieser letzte Prozeß hat unter Druck zu geschehen. Man bringt zu diesem Zweck das Bakelit B in einen Autoklaven, dessen innerer Druck ungefähr 2 Atmosphären über dem Druck liegt, welchen die bei der Polymerisation beteiligten Gase besitzen. Den inneren Druck im „Bakelisator" kann man durch einen Luftkompressor hervorrufen oder durch Kohlensäureflaschen. Den Autoklaven, welchen man hier auch als Bakelisator be-

Digitized by Google

zeichnet, heizt man zweckmäßig durch äußere oder innere Dampfschlangen. Es sollen Temperaturen bis zu 180° erreichbar sein. Ein derartiges Druckgefäß (Bakelisator) wird durch die Abbildungen Abb. 10 und 11 veranschaulicht. Nach 2—3 Stunden Erhitzung bei 140 bis 180° geht Bakelit B vollständig in Bakelit C über.

Bei der Herstellung von Bakelitprodukten kann man von gleichen Teilen Phenol und Handelsformaldehyd unter Benutzung einer geringen Menge eines alkalischen Katalysators ausgehen. Die Benutzung einer Säure als Kontaktsubstanz würde die Erhärtung erschweren, unter Umständen ganz ausschließen.

29. Die Eigenschaften des Bakelits.

Das fertige synthetische Kunstharz Bakelit, also in dritter Modifikation C, ist ein helles, durchsichtiges Produkt, sehr fest, wenig elastisch, lichtbrechend, unlöslich und unschmelzbar. Es widersteht Temperaturen bis 300° und verkohlt, ohne zu erweichen. Das spezifische Gewicht beträgt 1,25. Elektrisch ist es hoch isolierend, es hält pro Millimeter bis 23000 V aus, die Dielektrizitätskonstante ist 6—8, der Volumwiderstand beträgt bis 20000 Millionen Megohm cm^2/cm. Bei derselben Sorte Bakelit wurde ein Oberflächenwiderstand von 900 Millionen Megohm/cm festgestellt, bei einer Luftfeuchtigkeit von 90 bis 100%. Dem Hartgummi gegenüber zeichnet es sich dadurch aus, daß es auch bei Sonnenbeleuchtung seine Oberflächenisolation behält.

Bakelit widersteht Feuchtigkeit und Wasserdämpfen, ebenso kalter und heißer verdünnter Schwefelsäure, konzentrierter Salz- und Flußsäure. In allen Lösungsmitteln ist es unlöslich, von Brom, heißer konzentrierter Schwefel- und Salpetersäure wird Bakelit jedoch angegriffen. Bakelit C läßt sich nicht mehr in der Hitze zusammenschweißen wie B, seine Plastizität hat es verloren.

30. Verarbeitung des Bakelits zu elektrischen Isolierstoffen.

Für den direkten Gebrauch als elektrischer Isolierstoff ist Bakelit nur in Ausnahmefällen geeignet. Denn Bakelit stellt ein Grundmaterial dar, aus welchem mit Hilfe anderer Stoffe erst das technisch zu verwendende Isoliermaterial angefertigt wird. Diese Stoffe, mit welchen das Bakelit verarbeitet wird, bestehen in einem geeigneten Faserstoff wie Zellulose, Holzmehl, Asbest und evtl. einem neutralen Füllstoff, sowie unter Umständen einer Farbe; bei Lacken Füll- und Lösungsmitteln.

Die Verarbeitung von Bakelit zu elektrischen Isolierkörpern geschieht entweder, indem man reines Bakelit A bezieht und dieses weiter benutzt, oder aber, indem man die von der Bakelite-Gesell-

Digitized by Google

schaft preßfertig hergestellten Mischungen anwendet und durch Pressen und Erhitzen in die gewünschten Isolierkörper überführt.

Fertige Preßmischungen stellt die Bakelite-Gesellschaft der Hauptsache nach in zwei verschiedenen Sorten her, und zwar eine Holzmehlmasse sowie eine Asbestmasse. Es bedarf keiner besonderen Auseinandersetzung, daß es sehr auf die Beschaffenheit der Holzmehl- wie der Asbestfaser ankommt, um eine hochwertige Ware zu erzielen. Gegenüber der mit Holzmehlmischung angefertigten Substanz zeichnen sich die Asbestpreßlinge durch erhöhte Feuer- und Wärmesicherheit sowie bessere mechanische Eigenschaften aus, vor allem in bezug auf Zähigkeit. Dem Asbest fügt man bis 40% Bakelit bei, dem Holzmehl bis 50%. Die Holzmehlmischung wird meistens schwarz gefärbt. Das für diese preßfertigen Massen zu benutzende Bakelit ist die feste Modifikation A.

Die Verarbeituug zu Isolierkörpern geschieht folgendermaßen. Man prüft zunächst, ob die Preßmischung trocken ist. Sonst ist die Feuchtigkeit zu verdunsten, was mit großer Vorsicht zu geschehen hat. Man wiegt dann das trockene, faserige Preßpulver ab und füllt es in die bereits auf 160—170° vorgewärmten Stahlformen, deren glatte Wandungen mit einem geeigneten Schmiermittel, z. B. Olein, leicht bestrichen sind. Der Druck der hydraulischen Presse soll so bemessen sein, daß auf jedes Quadratzentimeter der Oberfläche des entstehenden Preßlings 150 kg Gewicht kommen. Während des Pressens ist die Stahlform am besten mittels Dampfs zu heizen, so daß die Masse gleichmäßig 165° warm wird. Vor Überheizung hat man sich bei Holzmehlmischungen zu hüten, da sonst Zersetzung eintritt. Besitzt der Preßling eine namhafte Stärke, so läßt man zunächst eine kurze Zeit, z. B. 1 Minute lang, den hydraulischen Preßdruck auf die heiße Preßmasse wirken. Dann entfernt man für einen Augenblick den Druck. Es wird auf diese Weise der in der wolligen Ausgangsmasse eingeschlossenen Luft sowie den entstehenden Gasen Gelegenheit gegeben, zu entweichen. Nunmehr wird der mechanische Druck auf die Masse wieder in voller Höhe von 150 kg/qcm hergestellt. Man läßt Druck und Hitze je nach Größe des zu erzielenden elektrischen Isolierkörpers 10 — 20 Minuten lang, mitunter noch länger, einwirken. Unter diesen Verhältnissen vollzieht sich die Umwandlung des Bakelits A in seine höheren Modifikationen, wenn auch zunächst noch nicht quantitativ.

Die Preßkörper lassen sich mit einer Hochglanzoberfläche versehen, wenn man sie vor dem Herausnehmen in der Form abkühlt, indem durch die Dampfkanäle der Stahlform kaltes Wasser geschickt wird.

Den Preßvorgang kann man wirtschaftlicher gestalten, wenn mehrere Formen übereinander angebracht werden, d. h. die hydraulische Preßanlage besser ausgenutzt wird.

Digitized by Google

Im allgemeinen sind die Isolierkörper nach der Herausnahme aus der hydraulischen Presse noch nicht gebrauchsfähig, sondern, um den Vorgang der Polymerisation, also der Überführung des Bakelits A in die unangreifbare undissoziierbare Form C restlos durchzuführen, werden die Preßkörper noch in einem Heizschrank bis zu 10 Stunden und mehr einer höheren Temperatur ausgesetzt. Holzmehl- und Zellulosestoffe sollen nicht über 120° und die Asbestfaserstoffe nicht über 180° erwärmt werden. In manchen Fällen handelt man noch vorteilhafter, wenn die nachträgliche Erhitzung im Bakelisator ausgeführt wird.

Man beschickt den Kessel mit einer Charge von Preßlingen und heizt bei der Anfertigung von Isolierkörpern aus Holzmehlmischung den Bakelisator mit einer Dampfspannung von höchstens 4 Atm. Überdruck. Im Innern des Kessels hat dann ein Druck von 4—6 Atm. Luft oder Kohlensäure zu herrschen. Die Asbestmischung verträgt entsprechend höhere Druckspannung. Die Zeit, während welcher zu bakelisieren ist, beträgt wie beim Wärmeprozeß im Trockenschrank bis zu 10 Stunden.

Die Herstellung von derartigen Isolierstoffen mit Hilfe von in der Hitze härtbaren Harzen unter Anwendung von Druck ist der Bakelite Gesellschaft geschützt (D.R.P. 233803).

Bei der Verwendung von Bakeliten für Hochspannungszwecke, wo die sichere elektrische Isolation im Vordergrund steht, hat man unbedingt auf quantitative Überführung der niederen Modifikationen in die Form C hinzuarbeiten. Selbsverständlich hängt auch die elektrische Festigkeit von der mehr oder weniger vollkommenen Mischung mit der Faser und der Höhe des Preßdrucks ab.

Die Verwendung von Bakelit für die Herstellung elektrisch isolierender Massen kann natürlich auch in der Weise geschehen, daß man sich nicht an die von der Bakelite-Gesellschaft m. b. H. bereiteten verkäuflichen Mischungen bindet. Sondern es ist unter Umständen vorteilhaft, Bakelit A von dort rein zu beziehen und die Mischungen für die Preßlinge selbst anzufertigen. Diese Art der Verarbeitung findet in vielen Fällen statt.

31. Die elektrische Festigkeit von Bakelitmaterialien.

Zur Feststellung der Beschaffenheit von im Handel befindlichen elektrischen Isolierstoffen, hergestellt aus Bakelit mit Holzmehl bzw. Asbestfaser, wurden kürzlich im Karlsruher Hochspannungslaboratorium des Elektrotechnischen Instituts (Prof. Dr. Schwaiger) Untersuchungen vorgenommen, und zwar sind gegen 130 Durchschlagsversuche angestellt mit Platten von ungefähr 3—4 mm Stärke unter verschiedenen Bedingungen. Die Prüfung erfolgte mit Wechselstrom von 50 Per/sec, bei sinusförmiger Kurvenform. Die Leistung des Generators betrug

Digitized by Google

15 kW. Durch Erhöhung des Erregerstroms wurde jede halbe Minute die Prüfspannung um 800 V gesteigert. Die relative Feuchtigkeit der Luft belief sich auf 40—50%, der Barometerstand war 753—762.

Durchschnittlich dauerte jeder Versuch ungefähr 15 Minuten. Die Spannungssteigerungen wurden durch ein registrierendes Instrument aufgezeichnet. Als Elektroden waren Kugelpaare von 1—15 cm Durchmesser verwendet, um so die Eigenschaften der Dielektrika besser kennen zu lernen. Die Durchschlagsfestigkeit des Materials zwischen ebenen Elektroden läßt sich berechnen, wenn man den Kugeldurchmesser unendlich groß annimmt.

Es wurden zwei Arten von Platten aus Asbestmischung geprüft. Die eine Sorte zeigte Durchschlagsfestigkeiten im homogenen Feld, welche bei Zimmertemperatur von 15° in den Grenzen von 50000 bis 70000 V/cm gelegen waren. Es kamen auch Werte von nur 42000, aber auch solche von 78000 V/cm vor. Hatten die Platten vor der Versuchsanstellung 24 Stunden im Wasser gelegen, so bedingte dies keine Änderung in ihren Durchschlagswerten. Bei einer Erwärmung auf 60° war die Durchschlagsfestigkeit zurückgegangen.

Die andere Sorte Platten aus Asbestmischung hatte bei 15° niedrigere Durchschlagswerte, und zwar in den Grenzen von 30000 bis 50000 V/cm im homogenen Felde. Es konnte auch hier festgestellt werden, daß eine vorherige 24 stündige Lagerung der Platten in Wasser keine Verschlechterung der Durchschlagsfestigkeit hervorruft. Dagegen behält die elektrische Festigkeit dieses Materials bei einer Temperatur der Platten von 60° noch einen Wert von ungefähr 27000 V/cm.

Bei der Prüfung der mittels Holzmehls hergestellten Bakelitplatten sind die Unterschiede in der elektrischen Festigkeit in einem weniger hervortretenden Maßstabe vorhanden. Die Punkte der Durchschläge liegen gleichmäßiger verteilt. Die Durchschläge befinden sich in dem Bereich von 45000 — 60000 V/cm im homogenen Felde. Wasserlagerung hat wiederum keinen Einfluß. Bei einer Erwärmung des Materials auf 60° hält sich die elektrische Festigkeit noch ungefähr auf der Hälfte der früheren Werte.

Die zweite, mittels Holzmehlmischung angefertigte Bakelitplatte zeigte sich in ihrem Gefüge gleichmäßiger wie das vorher untersuchte Material. Die Durchschlagsfestigkeit liegt in den Grenzen von 55000 bis 60000 V/cm im homogenen Feld. Durch 24 stündiges Liegen im Wasser wird keine Änderung in den elektrischen Festigkeitsverhältnissen hervorgerufen. Die Prüfung bei einer Temperatur der Platten von 60° zeigt, daß die Durchschlagsfestigkeit noch ungefähr die Hälfte der Werte von vorher beträgt.

Berücksichtigt man die Eigenschaften von Asbest- und von Holzmehl und zieht man die Aufbereitung der Massen in Betracht, so

Digitized by Google

sind die durch die Versuche an den Platten festgestellten Eigenschaften erklärlich.

Jedenfalls ist für die üblichen Anwendungszwecke die Gleichmäßigkeit des Isolierstoffs hinreichend, denn grobe Fehler wurden bei den Bakelitmaterialien nicht festgestellt.

Im übrigen dürfte es auf Grund der gemachten Ausführungen für einen Isoliertechniker gar nicht so schwer sein, eine erhöhte Homogenität des Materials sowie auch eine noch gesteigerte elektrische Festigkeit, besonders bei höheren Temperaturen, herbeizuführen.

32. Bakelitisolierstoffe, verglichen mit Schellackisolierstoffen.

Da Bakelitharz in vielen Fällen an die Stelle des als elektrisch hochwertig anerkannten Schellacks tritt, soll eine der amerikanischen Literatur entnommene vergleichende Angabe mitgeteilt werden.

Es wurden 24 Durchschlagsversuche unter ganz denselben Prüfbedingungen vorgenommen, und zwar an 1,6 mm starken Platten, die dadurch hergestellt waren, daß man Papiere, teils mit Schellack, teils mit Bakelit bestrichen, unter Druck zusammenpreßte. Die Grenze der elektrischen Festigkeit lag bei dem Schellackprodukt zwischen 39000 und 58000 V, also durchschnittlich bei 50460 V. Bei den Bakelitplatten wurde festgestellt, daß hier die Durchschlagsgrenze zwischen 44000 und 58000 V gelegen ist, also durchschnittlich bei 53700 V.

Von großer Wichtigkeit ist der Unterschied zwischen den beiden geprüften Plattensorten, daß die mit Schellack hergestellten Stoffe bereits bei Temperaturen erweichen, die erheblich unter 100° liegen, während die mit Bakelit angefertigten Massen bis gegen 300° Hitze aushalten.

33. Verarbeitung von Bakelitlacken.

Daß sich mittels Bakelits elektrisch hervorragende Lacke herstellen lassen, welche z. B. bei der Papierwickelei und der Mikanitfabrikation ausgedehnte Verwendung finden, ebenso bei der Anfertigung von isolierenden Gespinsten, soll hier erwähnt werden.

Diese Industrie, welche einen bedeutenden Umfang angenommen hat, wird später eingehend behandelt.

Die Imprägnierung von Spulen mit Bakelitlack wird ebenfalls in großem Maßstabe ausgeführt.

34. Die elektrische Festigkeit von reinem Bakelitharz.

Über die elektrische Festigkeit des reinen Bakelits, also des synthetischen Harzproduktes ohne Zusätze, ist zu berichten, daß Platten von 4 mm Stärke bei Anwendung von Kugelelektroden von 2 cm Durchmesser und sinusformigem Wechselstrom von 50 Per./sec. geprüft wurden. Wegen des Überschlagens in der Luft fand die Prüfung unter Öl statt.

Digitized by Google

Die eine Bakelitharzsorte ergab Durchschlagsfestigkeiten von im Mittel 92000 V/cm, die andere Sorte von 105000 V/cm. Im ersteren Fall schwankten die Werte zwischen 86000 und 96000 V/cm, im letzteren zwischen 97000 und 115000 V/cm.

35. Bakelitisolierstoffe, verglichen mit Hartgummi.

Vergleicht man die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Hartgummis bester Sorte mit den besten Bakelitprodukten, so findet man, daß sich beide Stoffe gleichwertig gegenüberstehen, die Bakelitkörper aber, was die Wärmebeständigkeit anlangt, das Hartgummi übertreffen.

Man hat es jetzt in der Hand, mit Hilfe der synthetischen Kondensationsharze elektrische Isoliermaterialien herzustellen, die bei normaler Temperatur 400—500 kg Biegefestigkeit pro Quadratzentimeter besitzen und einen wesentlichen Teil dieses Wertes noch bei Temperaturen bis gegen 300° behalten.

Nach Abschleifen der Oberfläche ergeben sich bei 2000 V Prüfspannung Oberflächenwiderstände bis zu 8 Millionen Megohm bei 50 % Luftfeuchtigkeit, die in dieser Höhe auch noch nach 24stündigem Liegen im Wasser vorhanden sind.

Die Durchschlagsfestigkeit läßt sich auf 10000—15000 V/mm bei dickeren Platten steigern, bei dünneren kann man es bis auf 20000 V/mm bringen.

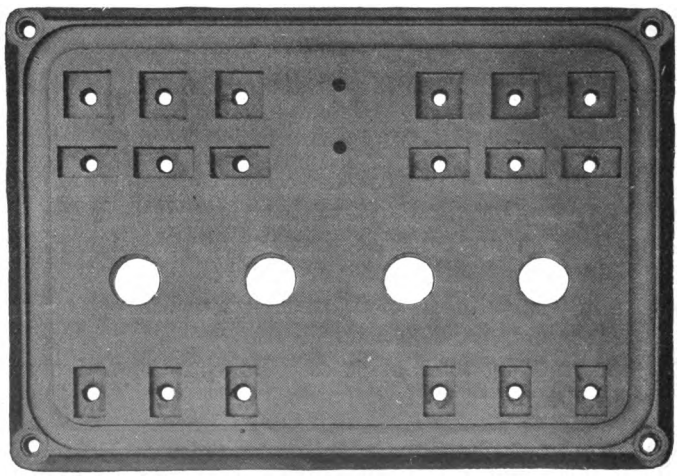


Abb. 12. Bakelit-Isolierkörper.

36. Verwendungsgebiet des Bakelits.

Die gepreßten Bakelitkörper werden fast stets in Größen und Formen hergestellt, welche sofort konstruktiv verwendungsfähig sind,

Digitized by Google

so daß keine weitere Bearbeitung nötig ist. Die Flächen treten scharf hervor, wie dies in Abb. 12 und in Abb. 13 zum Ausdruck kommt. Metallteile lassen sich bequem in die Formstücke einpressen.

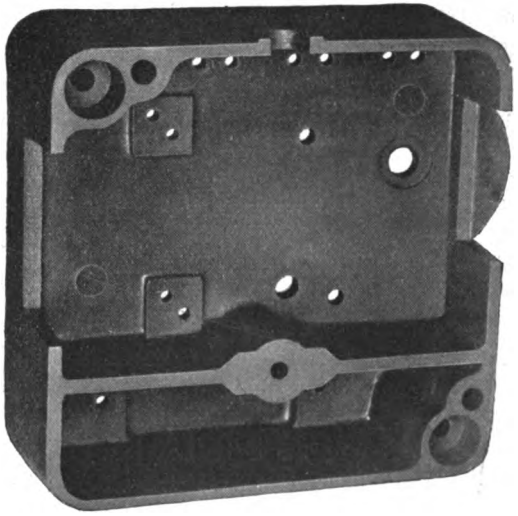


Abb. 13. Bakelit-Isolierkörper.

Die Herstellung von bakelithaltigen Isoliermaterialien hat sich außerordentlich eingeführt. Es wird, abgesehen von der Anfertigung keramischer und gummihaltiger Dielektrika, kaum eine Fabrik nichtleitender Preßstoffe geben, welche von der Verarbeitung der synthetischen Harze keinen Gebrauch macht.

Im Bakelit vereinigen sich hohe Durchschlagsfestigkeit und Isolation, absolute Feuchtigkeitsbeständigkeit, große Wärmefestigkeit, Unangreifbarkeit durch Öl und Lösungsmittel und noch verschiedene andere wertvolle Eigenschaften.

37. Feuchtigkeits- und hitzebeständige Isoliermaterialien aus hydraulisch abbindenden Stoffen.

Eine weitere Art der Herstellung von elektrisch isolierenden Körpern, besonders von solchen größerer Dimensionen, z. B. Platten jeder Art, besteht darin, daß man sich die Eigenschaft anorganischer Körper, mit Wasser hydraulisch abzubinden, nutzbar macht.

Hierbei entstehen zunächst Elektrolyte, die begierig Wasser aufsaugen und im Innern durch und durch porös sind. Eine Imprägnierung durch Tauchen in Schmelzmassen oder Lösungen hochwertiger Isolierstoffe hat nicht den Erfolg der Sicherheit, selbst wenn man Vakuum und Kompression zu Hilfe nimmt. Besonders bei abgebundenen Körpern namhafter Stärke kann man die Schmelzmittel, z. B. Paraffin oder ähnliche Dielektrika, keineswegs in genügender Weise in das Innere der Grundmasse hineinzwingen, um ein einheitliches Gefüge herzustellen.

Die mit Wasser zu festen Körpern erhärteten Platten oder Formstücke, welchen man zur Erzielung von Zähigkeit Asbest- oder Zellstoffasern beimischen kann, weisen starke Unterschiede in ihrem mineralischen Gefüge sowie auch in ihrer mechanischen Beschaffenheit auf.

Digitized by Google

Diese Unhomogenitäten durch Eintreibung isolierender Stoffe auszugleichen, läßt sich bei dünnen Stücken möglicherweise im Laboratorium, wenn es der Zufall will, fertig bringen. Fabrikatorisch ist es ausgeschlossen.

Es gibt aber Methoden, mit Hilfe abbindender Stoffe auf andere Art als durch Imprägnierung hochwertige Dielektrika anzufertigen. Da es sich um Verfahren handelt, welche die Firmen unter Aufwendung vieler Mühe und sehr großer Kosten ausgearbeitet haben, kann im Interesse dieser Werke einstweilen über solche Herstellungsweisen nicht eingehend berichtet werden. Die maschinellen Anlagen erfordern in diesem Falle einen außergewöhnlich großen Aufwand an Mitteln.

Ein derartiges elektrisches Isoliermaterial anorganischer Natur ist unter dem Namen Fermit III[1]) im Handel. Es wird von den Continentalen Isola-Werken A.-G. in Birkesdorf bei Düren hergestellt und ist ein schwarz aussehendes Material, welches für Schalttafeln, Zähler- und Verteilungstafeln und sonstige isolierende Unterlagen Verwendung findet. Es erfüllt sämtliche Bedingungen, welche der Verband Deutscher Elektrotechniker an einen Isolierstoff in Starkstromanlagen stellt.

38. Untersuchungsergebnisse an Fermit III.

Nach einem Bericht der Prüfstelle der Wirtschaftlichen Vereinigung von Elektrizitätswerken vom April 1921 lassen sich Fermit III-Platten leicht und sauber bohren. Selbst nach Lagerung in Wasserdampf[2]) sowie in Wasser weist es eine hohe Isolation auf und besitzt eine Durchschlagsspannung höher als 10000 V/cm.

Die Gewichtszunahme beträgt nach 24 stündiger Wasserlagerung nur Hundertstel Prozente, nach 12 stündiger Lagerung in Öl 0,26 %.

Wird Fermit III in eine Flamme gebracht, so ist es nach Herausnahme aus derselben nicht fähig, den Brand fortzupflanzen. Erhitzt man es auf 100°, so „werden Fermit III-Platten nicht weich, eher härter als vorher; sie werfen sich auch nicht und werden auch nicht rissig und brüchig".

Das Schlußurteil der Prüfstelle lautet: „daß Fermit III-Material gut ist und allen Bedingungen für Verwendung in Starkstromanlagen genügt, sich sogar für Hochspannung bis ungefähr 4000 V eignet".

Die Hitzebeständigkeit beträgt mehrere hundert Grad. Wie die herstellende Firma angibt, sind die Preise für Fermit III-Platten niedriger

[1]) Bültemann, A., Isoliermaterial für Starkstromanlagen, entsprechend den Bestimmungen des V. D. E. Elektrotechnische Umschau 1921, S. 345.

[2]) 10 mm starke Platten hatten nach 2 stündiger Dampflagerung noch 18000 Megohm Widerstand zwischen Vorder- und Rückseite sowie zwischen Bohrungen im Abstand von 10 mm. Die Feuchtigkeitsaufnahme betrug hierbei 0,07 %.

Digitized by Google

als diejenigen für Marmor, Schiefer, Kunststein und Weichmaterial, so daß also technisch wie wirtschaftlich ein großer Fortschritt erzielt ist.

Die Druckfestigkeit von Fermit III-Platten wurde mit 900 bis 1200 kg/qcm ermittelt, die Biegefestigkeit beträgt ungefähr 180—200 kg/qcm. Das spez. Gewicht ist 1,82, die Dielektrizitätskonstante 3,08—4,50, die Kugeldruckhärte 28—38 Brinellgrade.

39. In Starkstromanlagen nicht zulässige Isolierstoffe.

Überblickt man die Preßisolierstoffe, soweit sie z. Z. in Starkstromanlagen benutzt werden, so läßt sich feststellen, daß infolge der Rohstoffnot während des Krieges Material verwendet ist, welches den Anforderungen nicht genügt[1]). Dieser Zustand herrscht z. T. noch heute. Nach übereinstimmender Ansicht von angesehenen Fabrikanten, den Prüfämtern und den Sachverständigen werden jetzt noch Isolierstoffe benutzt, welche aus technischen Gründen nicht mehr Verwendung finden dürften.

Die hierher gehörenden minderwertigen Dielektrika zerfallen hauptsächlich in zwei Klassen. Zu der ersten gehören die sogenannten Kunstmarmor- oder Kunstschieferprodukte. Es sind Massen, die infolge ihrer Zusammensetzung leitende Eigenschaften besitzen, welche besonders bei Gegenwart von Feuchtigkeit zutage treten. Man pflegt derartige Marmorersatzstoffe, welche aus Gips, Zement, Magnesia u. dgl. Mischungen bestehen, mit Lösungen zu imprägnieren, erreicht aber dabei keine sichere isolierende Wirkung. Oft läßt sich feststellen, daß ein Wassertropfen oder ein Tintenfleck, welcher auf die Mittelschicht eines solchen durchgebrochenen Körpers gebracht wird, offensichtlich einzieht. Es ist empfehlenswert, eine Isolationsmessung nach 24-stündigem Liegen in Wasser oder in feuchter Luft vorzunehmen.

Die zweite Art minderwertiger Isolierkörper sind die schon mehrfach erwähnten sogenannten „Weichmaterialien", hergestellt durch Zusammenpressen von Füllstoffen, Fasern und niedrig schmelzenden Harzen, Pechen und dergleichen. Elektrisch weisen sie bei kurzer Prüfung oft ganz gute Isolationsziffern auf. Da sie aber den vorkommenden Temperaturen nicht standhalten, bilden sie eine außerordentliche Gefahr für die Betriebssicherheit der Netze[2]). Es ist anzuraten, daß der Bezieher die von ihm benötigten Isolierstoffe 5 Minuten in Wasser kocht, um zu prüfen, wie sie sich bei einer Wärme von 100° verhalten. Ganz schlechte werden dann schon weich.

---

[1]) Orlich, E., Die Anforderungen an feste Isolierstoffe und ihre Prüfung. El. Be. 1923, Heft 16, S. 181.

[2]) Einfluß der Wärme auf die elektrischen und mechanischen Eigenschaften von Isoliermaterialien. Auf Veranlassung des Engeneering Standard Committee in London. Wiener Zeitschrift 1905, S. 297.

Digitized by Google

Für den Bezieher ist eine von Passavant vorgeschlagene Vorprüfung äußerst leicht auszuführen und sehr lehrreich. Hält man ein brennendes Streichholz an das zu untersuchende Isoliermaterial, und zeigt es sich, daß die Masse dabei aufweicht oder zerfällt, so soll man den Isolier-

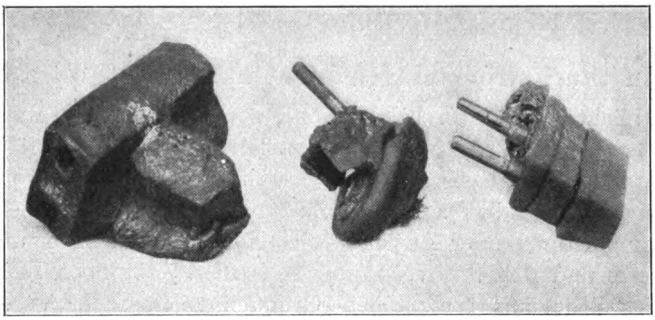


Abb. 14. Stecker aus „Weichmasse".

stoff nicht verwenden, Es ist dies ein Beweis dafür, daß kein festes Gerippe im Material vorhanden ist.

Würde man solche Weichmassen für Schalt- oder Verteilungstafeln, Zählerplatten, Schaltersockel oder alle die zahllosen Formstücke verwenden, wie sie in Starkstromanlagen erforderlich sind, so setzt man

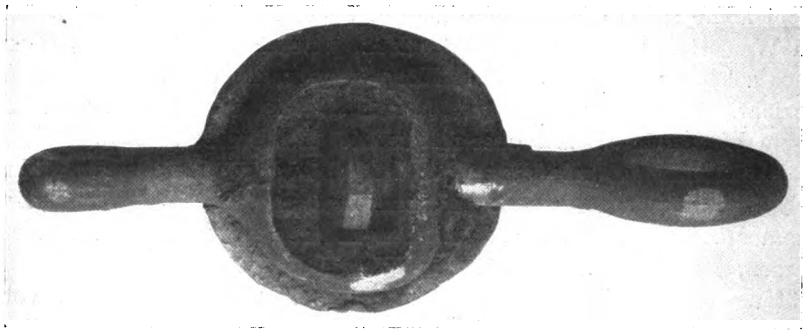


Abb. 15. Kugelisolator aus „Weichmasse".

sich der Gefahr aus, daß bei Erwärmungen, wie sie betriebsmäßig oder im Störungsfalle vorkommen, die Isolationsmasse allmählich wie ein Teig zusammenfällt. Viele von diesen Massen, wie daraus hergestellte Zählertafen, verziehen sich schon bei längerem Lagern an der Sonne[1]).

[1]) Meyer, Dr. Georg J., Die Untersuchung gepreßter Isolierteile mittelst Druckstempels. ETZ 1922, S. 1286.

Digitized by Google

In Abb. 14 sind Ansichten[1]) gegeben von z. Z. noch auf dem Markt befindlichen Steckern und Verbindungsstücken aus „Weichmaterial", die den Zustand derselben nach betriebsmäßiger Erwärmung zeigen.

Abb. 15 stellt einen Kugelisolator[2]) für Schleifleitungen dar. Die Netzspannung war 220 V. Sonnenwärme hat genügt, die im Inneren der Kugel befindliche isolierende Masse aufzuweichen.

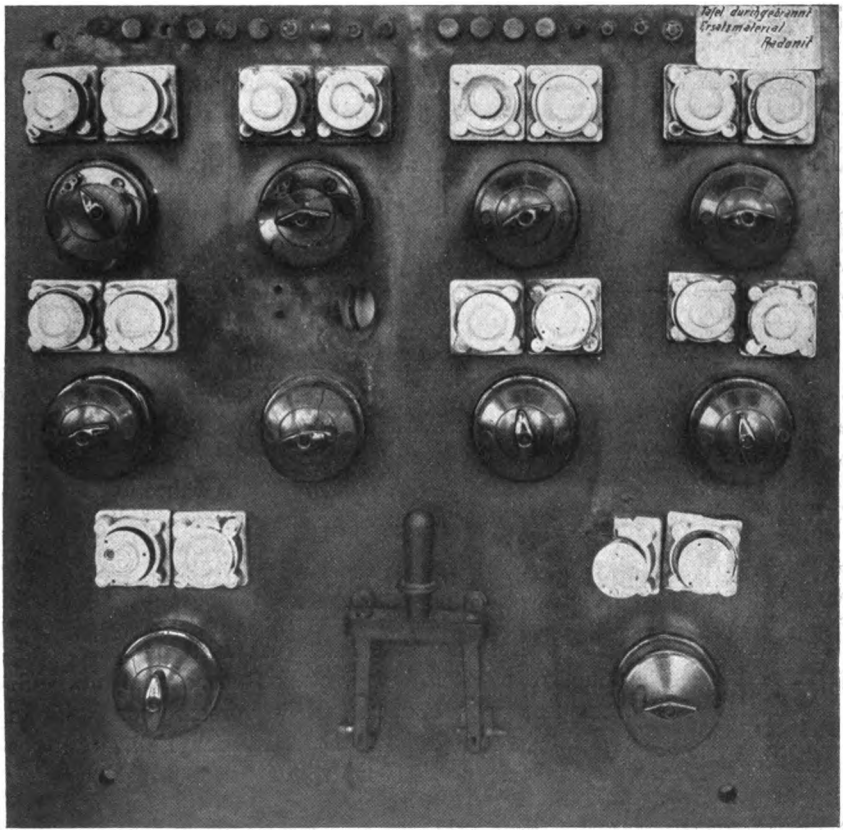


Abb. 16. Schalttafel aus „Weichmasse".

Abb. 16 zeigt eine Schalttafel[2]) von 1000 mm Höhe und 1000 mm Breite bei 25 mm Stärke. Sie besteht ebenfalls aus „Weichmaterial"

[1]) Bültemann, A., Isolationsmaterial für Starkstromanlagen. Mitteilungen der Vereinigung der Elektrizitätswerke 1922. Nr. 304.

[2]) Ausstellung minderwertiger Nichtleiter, gesammelt von der Kommission für Isolierstoffe des V. D. E.

Digitized by Google

und soll ein Ersatz für Marmor sein. Da der Ersatzmasse aber das wärmefeste Gerippe fehlt, sind die deutlich sichtbaren Schäden entstanden. Bei den beiden Sicherungen rechts unten hat ein durch den Strom warm gewordener Bolzen die Aufweichung der Grundplatte und einen Längsriß von ungefähr 10 cm hervorgerufen. Mehr oberhalb links gewahrt man ein Loch von 5 cm Durchmesser. Durch einen lose gewordenen Kontakt hat die Weichmasse ihren Halt verloren. Die Masse wurde direkt herausgerissen, man sieht hinter der entstandenen Öffnung einen Zuführungsdraht.

Bei diesen Erscheinungen ist der Umstand mit in Betracht zu ziehen, daß Weichmaterial an und für sich nachgiebig ist. Die Kontakte werden sehr oft von selbst lose, alse ohne daß besondere Betriebserschwerungen hierfür die Veranlassung zu bilden brauchen. Dann tritt sofort Erwärmung und Aufweichen des isolierenden Grundmaterials ein. Der Kurzschluß ist vorhanden.

Die Abbildungen sind eine Mahnung, Betriebsstörungen aus dem Wege zu gehen durch Verwendung hinreichend wärmefester Dielectrica.

Die Gefahr schwerer Schäden im Netz bei Verwendung von Weichmassen wird in besonderen Fällen noch erheblich größer[1]), nämlich dann, wenn die isolierenden Materialien Erschütterungen ausgesetzt sind. Man hat in vielen Anlagen damit zu rechnen. Die Lockerung der Kontakte erfolgt hier schneller. Auf einer wärmefesten isolierenden Grundplatte hat man lediglich die Schrauben während des Betriebes wieder anzuziehen, Weichmasse verschmort.

40. Arbeiten der Kommissionen des V.D.E., Isolierstoffe betreffend.

Vom Verbande Deutscher Elektrotechniker sind in den Kommissionen für Errichtungsvorschriften, für Installationsmaterial und für Isolierstoffe Bestimmungen ausgearbeitet, welche vorschreiben, daß ein Isoliermaterial feuersicher zu sein hat. Dies ist der Fall, wenn es überhaupt nicht brennt, oder wenn sich der Brand nicht selbständig fortpflanzen kann.

Die zweite Bedingung ist, daß das Isoliermaterial in Starkstromanlagen wärmesicher zu sein hat. Dies trifft zu, wenn es den höchsten im Betrieb oder bei Störungen vorkommenden Temperaturen widersteht, ohne deformiert zu werden.

In den neu in Arbeit befindlichen Vorschriften für Isolierstoffe, welche in Starkstromanlagen Verwendung finden, werden höhere Ansprüche an die Dielektrika gestellt, wie es bisher der Fall gewesen

[1]) Worauf besonders B. Schöne (Dortmund) hingewiesen hat.

Digitized by Google

ist. Vor allem sind besser präzisierte Prüfmethoden ausgearbeitet[1]). Es kommt nicht nur darauf an, daß ein Isoliermaterial z. B. 100° Wärme aushält, ohne zu erweichen, sondern es soll bei dieser Temperatur von 100° noch einen wesentlichen Teil seiner mechanischen Festigkeit behalten, welche es bei 20° besitzt.

Die seit dem 1. Januar 1921 gültige Vorschrift des Verbandes, Handgriffe betreffend, lautet, daß der Werkstoff Isoliermaterial zu sein hat, und daß dieses Isoliermaterial bei Temperaturen bis 100° keine den Gebrauch beeinträchtigende Veränderungen erleidet.

Zur besseren Erfassung des Gebiets der Nichtleiter sind neuerdings von der Kommission für Isolierstoffe des V. D. E. Untergruppen gebildet[2]). Diese umfassen: Gepreßte gummifreie Isoliermaterialien; geschichtete und geklebte Materialien; natürliche Gesteine und deren Ersatz; keramische Materialien; gummihaltige Isolierstoffe[3]); Faserstoffe, auch imprägnierte, einschließlich Asbest; Lacke und Tränkmittel; Öle.

Die Arbeitsgebiete greifen in vielen Fällen ineinander über.

41. Der Markt der Isolierstoffe.

Die deutsche isoliertechnische Industrie liefert eine ganze Anzahl in elektrischen Starkstromanlagen gut verwendbarer Materialien. Es würde deshalb für die Interessenten wünschenswert erscheinen, diese elektrischen Isolierstoffe einwandfreier Beschaffenheit hier namentlich aufgeführt zu finden.

Aber es ergeben sich Schwierigkeiten. Es ist leider Sitte geworden, daß die Fabrikanten ihre Dielektrika mit Bezeichnungen belegen, die

---

[1]) Siehe Prüfvorschriften des V. D. E. für die Untersuchung elektrischer Isolierstoffe, z. B. dieses Buch S. 380ff. Siehe ferner: Meyer, Dr. G. J., Die Untersuchung gepreßter Isolierteile mittelst Druckstempels. ETZ. 1922, S. 1285. Derselbe, Eine vereinfachte elektrische Prüfung von Isoliermaterialien. ETZ. 1923, S. 10. Derselbe, Änderung der vereinfachten elektrischen Prüfung von Isoliermaterialien. ETZ. 1923, S. 880. Schiff, Dr., Klassifizierung der Isolierpreßmassen. ETZ. 1923, S. 137. Schob, A., Festigkeitsuntersuchungen an elektrischen Isolierstoffen. ETZ. 1923, S. 1086. Turner u. Hobart, Die Isolierung elektrischer Maschinen. Berlin: Julius Springer 1906. Wernicke, A, D.ie Isolierstoffe der Elektrotechnik. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn 1908. Schreiber, K. A., Theorie, Berechnung und Untersuchung von Transformatoren. Stuttgart: Ferdinand Enke 1912. Hinrichsen, F. W., Über Isoliermaterialien der Elektrotechnik und deren Prüfung. Kunststoffe 1914, S. 41. Schreiber, K. A., Materialprüfungsmethoden im Elektromaschinen- und Apparatebau. Stuttgart: Ferdinand Enke 1915. Demuth, Walter, Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. Berlin: Julius Springer 1920. E. Grünwald, Mechanische Festigkeit von Handlampengriffen. ETZ. 1923, S. 1030.

[2]) Orlich, E., Die Tätigkeit der Isolierstoffkommission des V. D. E. ETZ 1923, S. 171.

[3]) Gummiisolierte Drähte und Kabel scheiden aus, da eine besondere Kommission hierfür besteht.

Digitized by Google

oft keine bestimmten Eigenschaften gewährleisten und daher wenig kennzeichnend sind. Man hat teilweise auch den Namen Ziffern beigefügt, um abweichende Beschaffenheiten dadurch zum Ausdruck zu bringen. Aber bei vielen Werken ist auch diese Angabe keine sichere Gewähr für ein Material bestimmter Zusammensetzung. Es ist keineswegs selten, daß Massen von ganz verschiedenartigen Rohmaterialien stammen und trotzdem dieselbe Gattungsbezeichnung tragen. Diese Verhältnisse sind außerordentlich bedenklich und schädigend für die zweckmäßige Verwendung der Nichtleiter.

Es würde ein wesentlicher Fortschritt in der Elektrotechnik sein und unsicheren Zuständen ein Ende bereiten, wenn endlich eindeutige Bezeichnungen für Isolierstoffe eingeführt würden. Dann weiß der konstruierende Ingenieur genau, was für Materialien er benutzt, und er braucht nicht vorher oder später nach Lieferung durch Stichproben und Prüfungen erst zu ermitteln, wie es um die Beschaffenheit der Isolierstoffe steht.

Es ist zu erwarten, daß die neugeschaffene Prüfstelle des Verbandes Deutscher Elektrotechniker in Berlin, Potsdamerstraße 68, einen heilsamen Einfluß auf die jetzigen Zustände der irreführenden Qualitätsbezeichnungen ausübt. Die Tätigkeit des V. D. E. und die von ihm erlassenen Vorschriften sind, wie u. a. C. L. Weber in der E. T. Z. zum Ausdruck gebracht hat, die Vorbedingungen mit gewesen, daß die deutsche elektrotechnische Industrie zu ihrer Qualitätsstellung und damit zu einer führenden Rolle in der Welt gekommen ist.

Im Anschluß an die Elektrotechnische Abteilung der Bayrischen Landes-Gewerbeanstalt in Nürnberg ist jetzt eine Untersuchungsstelle eingerichtet, wo geprüft werden soll, wie sich die elektrischen Isolierstoffe verhalten, wenn sie in technischen Konstruktionen und Apparaten eingebaut sind[1]). Es wird also hier nicht das Material an sich einer Belastungsprobe unterzogen, sondern die Betriebsfähigkeit des ganzen Systems wird untersucht. Dabei soll sich herausstellen, wie sich die Isolierstoffe in diesen Fällen verhalten.

Bei dieser Gelegenheit wird sich auch zeigen, ob vom Konstrukteur der Besonderheit der Nichtleiter Rechnung getragen wurde. Denn das zweckmäßigste Isoliermaterial kann Veranlassung zu Störungen bilden, wenn es an falscher Stelle oder in unrichtigen Dimensionen verarbeitet wird.

Wenn man der Ursache nachforscht, weshalb unter den für die Herstellung betriebssicherer elektrischer Anlagen so wichtigen isolierenden

[1]) Edelmann, O., Mechanische Beanspruchung von Hebelschaltern (Mitt. d. V. D. E.-Untersuchungsstelle für Isoliermaterialien in Nürnberg). ETZ 1923, S. 291. — Derselbe, Die Untersuchungsstelle des Verbandes Deutscher Elektrotechniker für Isoliermaterialien. El. Be. 1923, Heft 16, S. 184, hzw. Steamag Nachrichten 1923, Nr. 3.

Digitized by Google

Baustoffen viel unzweckmäßige Massen vorkommen, stellt man fest, daß dies mit der Preislage zusammenhängt. Die Weichmassen und Kunststeine sind etwas billiger wie die betriebssicheren Stoffe. Dies verleitet in Unkenntnis der möglichen Folgen manchen Konstrukteur und Bezieher, die schlechtere Ware aus Billigkeitsrücksichten zu bevorzugen. Es bedeutet aber ohne jeden Zweifel einen großen Fehler, wirtschaftlich wie technisch, denn die geringen Mehrkosten für besseres, dem Verwendungszweck tatsächlich gerecht werdendes Material werden aufgewogen durch die erzielte Sicherheit eines nicht gefährdeten Betriebes.

Insbesondere bei Lieferung elektrotechnischer Erzeugnisse ins Ausland darf die deutsche Industrie unter keinen Umständen Fabrikate hinausgehen lassen, bei denen die isolierenden Baustoffe zweifelhafter Natur sind. Die Anforderungen an die Materialien, aus denen die Anlagen bestehen, sind dort zum Teil, wie in den Tropen, wesentlich höher als bei uns.

Der Isolierstoffe verarbeitende Ingenieur sollte es sich auch nicht mehr gefallen lassen, daß ihm von berufener und unberufener Seite Nichtleitermaterial angeboten wird, ohne daß der Lieferant für dessen zahlenmäßig gekennzeichnete Eigenschaften Garantie übernimmt.

Es ist infolge der verschärften Vorschriften des V. D. E. anzunehmen, daß die geschilderten Übelstände demnächst verschwinden.

Unter den Beziehern und Verbrauchern von Preßisolierstoffen sind die Mitglieder der Vereinigung der Elektrizitätswerke zu benennen als einer geschlossenen Körperschaft, die sehr viel dazu beitragen kann, minderwertige Isoliermaterialien von der Verwendung in Starkstromnetzen auszuschließen. Zielbewußte Bestrebungen sind nach dieser Richtung hin im Gange.

Auch die großen Feuerversicherungs-Gesellschaften haben an diesen Fragen lebhaftes Interesse.

Die deutsche isoliertechnische Industrie, von welcher die Herstellung der Preßstoffe nur einen Teil darstellt, hat sich zu einem namhaften Faktor im einheimischen Wirtschaftsleben entwickelt. Es werden insgesamt mehr als 60000 Arbeitskräfte beschäftigt. In manchen Zweigen, z. B. der Gummi-, der Kabel-, der Porzellanfabrikation ist in vielen Werken eine Arbeitsweise auf wissenschaftlicher Grundlage eingeführt, während bei der Fabrikation von Preßisoliermassen noch sehr oft die methodische sinngemäße Herstellung fehlt. Infolgedessen trifft man hier auf Zustände, die längst überwunden sein sollten.

Der betriebleitende Ingenieur einer Isolierstofffabrik muß unbedingt die Natur seiner Rohmaterialien kennen, insbesondere ihre elektrolytischen Eigenschaften. Und muß ferner wissen, daß die zwischen einem Preßisolierkörper angelegte Spannung sich in der Masse verteilt, umgekehrt wie die dort herrschenden Kapazitäten, welche durch Un-

Digitized by Google

gleichmäßigkeiten, Schichtenbildung, Luft und Wasserdampf, Fremdkörper und andere Einschlüsse bedingt sind. Es liegen ähnliche Verhältnisse vor wie in einer Porzellankette.

Für Fortschritte in der Industrie isolierender Preßlinge ist wünschenswert, daß sich diesem Gegenstande gut vorgebildete Fachleute, insbesondere chemische Kräfte[1]), mehr annehmen, wie es bisher geschehen ist. Der erfinderischen Phantasie sind hier noch zahlreiche Wege frei.

Nach irgendwelchen Vorschriften oder sogenannten Rezepten die Fabrikation von elektrischen Isolierstoffen ohne ständige Mitarbeit und Aufsicht von Spezialtechnikern vorzunehmen, ist eine schiefe Sache. Gerade auf Gebieten, welche durch viele bisher noch nicht geklärte Erscheinungen gekennzeichnet sind, kann eine exakte wissenschaftliche Behandlung nicht entbehrt werden.

Wünschenswert ist ferner, daß die berufenen Forschungsstätten für naturwissenschaftliche und technische Fragen durch weitere Untersuchungen der Sache nützen. Die fortschrittliche Entwicklung des deutschen Wirtschaftslebens ist wesentlich mit hervorgerufen durch die vereinigte Arbeit von Wissenschaft und Industrie.

42. Der wirtschaftliche Wert der elektrischen Isolierstoffe.

Wie aus den vorhergehenden Ausführungen zu entnehmen ist, besitzen die industriell hergestellten elektrotechnischen Isolierstoffe, insbesondere die Preßmassen, noch mancherlei Mängel. Es tritt die Frage auf, wie dieser Zustaud bei unserer hochentwickelten elektrotechnischen Wirtschaft zu erklären ist.

Der Grund hierfür darf wohl darin gesucht werden, daß für die Herstellung zweckentsprechender Dielektrika Kenntnisse auf verschiedenen ziemlich weit auseinanderliegenden Wissensgebieten erforderlich sind, und die Erscheinungen in den Isolierstoffen unter Spannungsbelastung nicht in voller Klarheit erforscht wurden.

Weiter aber kommt hinzu, daß der Elektroingenieur scheinbar den Wert der von ihm verarbeiteten Isolierstoffe unterschätzt.

Während man den Leitern in Gestalt der verschiedenen Metalle und Metallegierungen eine große Aufmerksamkeit zugewendet hat und zielbewußt dahinstrebte, die Leiter so auszuwählen und zusammenzusetzen, daß sie einen Höchstgrad von Wirksamkeit für die Zwecke der elektrotechnischen Verarbeitung darstellen, sind derartige Bemühungen, was Nichtleiter betrifft, in vielen Fällen nur kümmerlich ausgefallen.

Der Nichtleiter, das Dielektrikum, ist jedoch ein ebenso wichtiger Baustoff in der elektrischen Technik, wie es der Leiter ist.

[1]) A. Bültemann, Aus der Industrie der elektrischen Isolierstoffe. Zeitschr. f. angew. Ch. 1921, Jahrg. 34, Nr. 91 u. 92.

Digitized by Google

Wägt man den Einfluß dieser beiden Gruppen ab, so kann man feste stellen, daß die Dauer der Brauchbarkeit von Maschinen, Apparaten und Anlagen in weit höherem Maße vom Isoliermaterial abhängt als vom Stromleiter[1]). Erstere unterliegen den Einwirkungen elektrischer Kräfte bzw. den dabei auftretenden Nebenerscheinungen wesentlich mehr als letztere.

Will man daher den Leistungsgrad und die Lebensdauer elektrotechnischer Erzeugnisse und Anlagen steigern, läßt sich dies dadurch erreichen, daß man hochwertige und sichere Dielektrika verarbeitet.

Dies gilt natürlich bei Isolierstoffen in Hochspannungsnetzen in noch höherem Grade wie bei solchen in Starkstromanlagen.

Fortschritte in der Elektrotechnik herbeiführen heißt daher, die Eigenschaften der Isolierstoffe verbessern[2]).

43. Das Kunsthorn Galalith.

Unter die als elektrische Isoliermaterialien verwendeten Preßstoffe gehört auch das, wie der Name besagt, aus Milch hergestellte Kunsthorn Marke Galalith[3]). Benutzt man zur Abscheidung dieses Kaseinkörpers aus Magermilch statt verdünnter Säuren Labferment, so erhält man einen ziemlich haltbaren Niederschlag, der fein zu vermahlen und innerhalb 10—12 Stunden weiter zu verarbeiten ist. Die feuchte, gewünschtenfalls mit Farbstofflösungen versetzte Masse wird mittels gleitenden Drucks geknetet, um dadurch eine möglichst hohe Plastizität zu erzielen. Alsdann preßt man die Substanz in Formen.

Die Hauptschwierigkeit bei der Fabrikation besteht im Härten der Masse mit Formaldehyd, einer mitunter langwierigen und viel Zeit erfordernden Tätigkeit. Die Trocknung des entstandenen Körpers erfolgt im warmen Luftstrom.

Die Isolation des Kunsthorns Marke Galalith in trockenem Zustand ist ganz gut; gegen Nässe ist es jedoch äußerst empfindlich und stark hygroskopisch. In heißem Wasser wird es weich. Brennbar ist Galalith nicht, auch ist es beständig gegen Öle, Fette, Benzin, Äther u. a.

Die Benutzung als Isolierstoff in der Elektrotechnik ist trotz der guten Bearbeitungsfähigkeit eine ziemlich beschränkte. In Spezialfällen läßt es sich jedoch verwenden, z. B. in der Apparatetechnik. Für Starkstromanlagen kommt es nicht in Betracht.

44. Steatit.

Rein keramischer Zusammensetzung sind die unter dem Namen Steatit im Handel befindlichen Isoliermaterialien. Der Speckstein,

[1]) Siehe auch BBC Mitt., Jahrg. IX, S. 176 u. 181.

[2]) A. Bültemann, Die Fabrikation elektrischer Isolierstoffe und ihre Ziele. El. Be. 1923, Heft 16, S. 182.

[3]) Hersteller ist die Firma: Internationale Galalith-Gesellschaft Hoff & Co., Harburg a. E.

Digitized by Google

das Rohmaterial, ist ein wasserhaltiges Magnesiumsilikat $3\,MgO \cdot 4\,SiO_2 \cdot H_2O$ bis $4\,MgO \cdot 5\,SiO_2 \cdot H_2O$, welches etwas Eisenoxyde sowie Spuren von Manganoxyden enthält. Es ist ein undurchsichtiges Mineral der Härte 1—2 und dem spez. Gew. von rund 1,6. Fundstätten befinden sich in Deutschland im Fichtelgebirge, wo es im Gestein eingebettet vorkommt und im Tagebau wie unterirdisch gewonnen wird. Brennt man dieses Mineral, so entsteht ein homogener, harter, Feuchtigkeit abweisender und elektrisch gut isolierender Körper. Infolge nur ganz geringer Schwindung beim Brennprozeß können aus reinem Naturstein kleine Formstücke mit größter Genauigkeit in ihren Maßen hergestellt werden.

Vorwiegend verarbeitet man auf elektrische Nichtleiter hin den Speckstein im gepulverten Zustande, und zwar trocken sowie feucht, indem man für das Brennen der in Pressen hergestellten Formstücke etwas Ton und ein Flußmittel zusetzt. Die Temperatur liegt ungefähr in derselben Höhe, wie sie beim Garbrennen des Porzellans üblich ist, nämlich bei Segerkegel 14—16. Die Steatitmassen glasiert man teils im Scharfbrand, teils im Glasurofen bei mindestens 900° C.

Unter der Bezeichnung Melalith versteht man Körper, die eine Art Zwischenstufe von Steatit und Porzellan bilden. Das Schwindmaß des Steatits beim Brennen beträgt ungefähr 1%, beim Melalith 6 bis 9%. Porzellan sintert bekanntlich um 15 bis 18% und mehr zusammen.

Es ist ein großer Vorteil der Steatitprodukte[1]), daß sie mit großer Genauigkeit anzufertigen sind. Deshalb kann man auch dünne Wandungen und äußerst exakte Formen herstellen. Weiter übertrifft Steatit das Porzellan dadurch, daß der Scherben an mechanischer Festigkeit erheblich besser ist, d. h. viel weniger spröde. Für manche Verwendungszwecke, wo Porzellan versagt, kann man Steatitprodukte mit Vorteil verwenden.

Große Freileitungsisolatoren hat man bereits aus Melalith hergestellt. Die elektrische Durchschlagsfestigkeit liegt bei ungefähr 60 bis 80 kV/cm.

Fabrikanten für Steatitmaterialien sind die Steatit-Magnesiawerke (Steamag) in Nürnberg.

45. Risse und Sprünge mehrteiliger Porzellanisolatoren.

Im Folgenden soll eine Angelegenheit besprochen werden, welche technisch und wirtschaftlich von außerordentlicher Bedeutung ist, nämlich die Art der Verkittung, wie sie sich für den Zusammenbau größerer Porzellanisolatoren erforderlich macht[2]).

[1]) Singer, F., Keramische Isolierstoffe. El. Be. 1923, Heft 16, S. 191.

[2]) Bültemann, A., Die Verkittung von Porzellanisolatoren. Elektrotechn. Umschau X. Jahrg. 1921. Nr. 23. — Risse und Sprünge in Porzellanisolatoren. Mitt. d. V. d. E. W. 1922, Nr. 305.

Digitized by Google

In den Ausführungen über die Isolierstoffe der Elektrotechnik ist an vorhergehender Stelle[1]) auseinandergesetzt, daß die großen Porzellanisolatoren nur sehr schwierig aus einem Stück herstellbar sind, weil sich die Gleichmäßigkeit und Spannungslosigkeit großer Porzellangegenstände beim Brennen nicht in genügender Weise erzielen läßt. Man muß daher die großen Hochspannungsporzellanisolatoren aus mehreren Teilen anfertigen, und die einzelnen Stücke durch einen Kitt miteinander verbinden. Der Kitt ist keine Masse, an welche notwendigerweise die Forderung elektrischer Durchschlagsfestigkeit und Isolation gestellt wird, sondern er dient dazu, unter bestimmten Bedingungen die Bestandteile des Isolators, also Porzellanteile, Kappen, Klöppel und sonstige Armaturen, wie z. B. Metallschirme, zu einem elektrisch und mechanisch festen Gebilde zu vereinigen.

Man hat bereits versucht, die Isolatorteile mit Schwefel, Pechen, Harzen, Blei, Gips und sonstigen Stoffen zu verkitten. Aber infolge der Sprödigkeit oder der zu großen Nachgiebigkeit, der Oxydierbarkeit, der Hygroskopizität oder der zu hohen Kosten dieser Kitte oder aus anderen Gründen der Mangelhaftigkeit ist man von allen diesen Verfahren abgekommen.

Darauf versuchte man es mit hydraulischem Zement. Die Verkittung der Isolatorscherben mit Zement ist jetzt fast durchgängig gebräuchlich. Es haben sich aber dabei nach Jahren schwere Schäden herausgestellt, weil die Porzellanteile rissig werden. Solche Zerstörungserscheinungen sind wegen ihrer großen technischen und wirtschaftlichen Nachteile in der Fachliteratur oft und eingehend besprochen.

In einer ausführlichen Untersuchung, betitelt Zerstörungserscheinungen an Hochspannungsanlagen, behandelt E. O. Meyer-Kreuzwald[2]) derartige Schäden. Es waren von ihm Deltaisolatoren eingebaut, welche aus drei Scherben bestanden, dem Oberteil, dem Mittelteil und der Hülse. Nach ungefähr zweijährigem Betrieb begannen die Durchschläge ständig zu wachsen. Die normale Spannung war 65000 V. Durch Dauerprüfung wurde ermittelt, daß ein Teil der Isolatoren oftmals entweder gar keine der bekannten Entladungen an den scharfen und daher stark elektrisch belasteten Teilen hören ließ, oder aber besonders starke. Beide Arten von Stücken wurden ausgewechselt. Es konnte an ihnen festgestellt werden, dass sie feine Haarrisse erhalten hatten, welche besonders gern am Oberteil des Isolators radial zur Achse oder kurvenförmig am Kopfe auftraten. Am Mittelteil und an der Hülse sind diese Schäden auch zu finden gewesen, aber wesentlich seltener. Fig. 17 bis 20, welche den E. O.

[1]) Weiker, W., Keramische Isolierstoffe.

[2]) ETZ 1919, Heft 16, S. 173, Heft 17, S. 188, Heft 18, S. 198, Heft 24, S. 278.

Digitized by Google

Meyerschen Untersuchungen entnommen sind, veranschaulichen den Charakter der Sprengrisse. Der Deutlichkeit halber sind diese mit weißer Farbe nachgezogen.

Es liegt klar auf der Hand, daß die Vernichtung der kostspieligen Porzellanisolatoren eine große Betriebsunsicherheit hervorruft und ständige hohe Ausgaben verursacht. Bei den vielen Tausenden von Porzellanisolatoren, welche für die Anlage einer elektrischen Stromverteilungbenötigt werden, kommt eine gewaltige Summe zusammen, die aufzuwenden ist, wenn laufend der größere Teil des elektrischen Porzellans ersetzt werden muß.

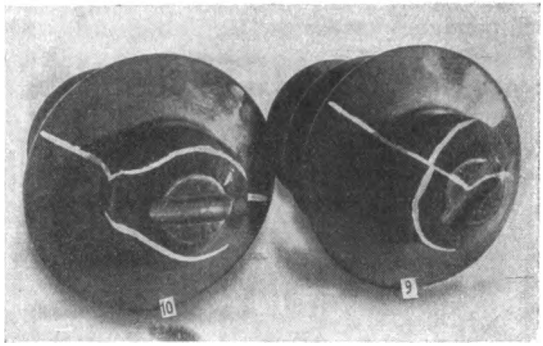


Abb. 17. Verlauf von Kopf- und Tellerrissen an 65 kV-Isolatoren.

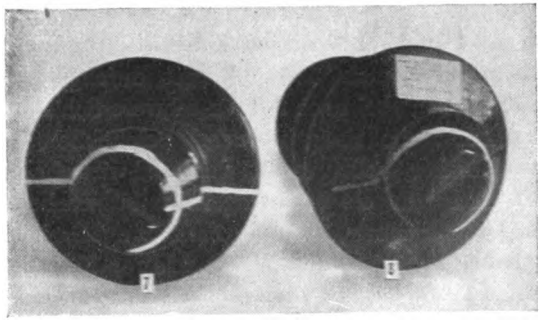


Abb. 18. Normaler Verlauf der Risse an 65 kV-Isolatoren.

Die Rissesicherheit der Leitungsisolatoren ist daher in vielen Fällen direkt eine Lebensfrage der Zentralen.

Da die Sprengung der Scherben nicht sofort auftritt, sondern oft erst nach 5 Jahren und mehr, ja mitunter erst nach 10 Jahren, war man anfänglich geneigt, die Schäden auf die Dauereinwirkung elektrischer Kräfte zurückzuführen. Es hat sich aber gezeigt, daß auch solche Isolatoren Sprengrisse bekommen, welche bei der Abnahme keine Fehler hatten und verpackt, auch keinen Temperaturdifferenzen ausgesetzt, längere Zeit auf Lager waren. Besonders durch die Untersuchungen von Petersen und die Beobachtungen in den Kraftzentralen wurde festgestellt, daß durch die Einwirkung des elektrischen Feldes auf die Porzellanmasse die Rissebildung nicht hervorgerufen werden kann. Porzellanisolatoren, welche nur aus einem Stück bestehen, wurden von Sprengrissen nicht heimgesucht. Um festzustellen, ob das elektrische Feld die Ursache der Sprengschäden ist, ging man zu wesent-

Digitized by Google

lich größeren Isolatortypen über, als den Betriebsspannungen nach notwendig war. Es stellte sich hierbei heraus, daß die Risse trotzdem in demselben Verhältnis wie vorher auftreten.

M. Krone[1]) (E. W. Westfalen) ließ 1914 eine 10000 V.-Leitung im Kreise Ahaus (Nord-Westfalen) bauen, die infolge des ausgebrochenen Krieges nicht in Betrieb kam, da das Kupfer gebraucht wurde. Als man sechs Jahre später die Drähte auflegte, zeigte es sich, daß mehr als die Hälfte der gekitteten Isolatoren Risse bekommen hatte, also ohne jemals durch das elektrische Feld beansprucht zu sein. Auch die übrigen Isolatoren dieser Leitung zeigten später zu einem erheblichen Teil Risse und Sprünge und mußten ausgewechselt werden.

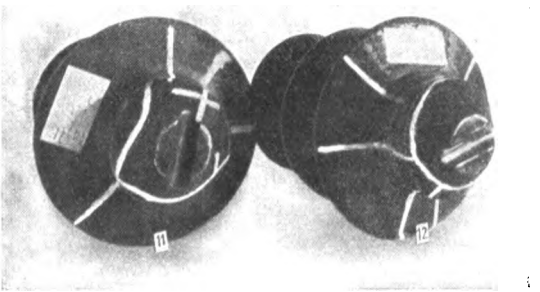


Abb. 19. Stark gerissene 65 kV-Isolatoren.

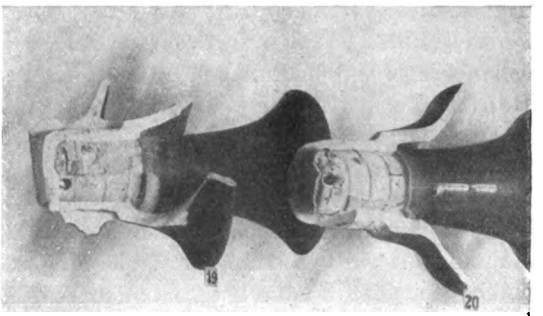


Abb. 20. Durchgeschlagene 65 kV-Isolatoren mit Rissen an Mittelteil und Stütze.

Beachtenswert ist auch die Erscheinung, daß bei gekitteten Porzellanisolatoren, welche zur Einfassung von Gartenbeeten verwendet wurden, sich ebenfalls Sprengrisse einstellten.

Ferner war auffallend, daß vor allem der obere Scherben sich als empfindlich erweist.

Auch die Annahme, daß nur mechanisch schlechtes Porzellan die Veranlassung zu Sprengschäden sein kann, muß fallen gelassen werden, da kein Anhaltspunkt für grobe Ungleichmäßigkeiten, mechanische Spannungsunterschiede usw. im Material vorhanden ist. Die Schuld an den Rissen und Durchschlägen den evtl. im Netz vorkommenden

[1]) Lt. einer Mitteilung von M. Krone in der Sitzung des Elektrotechnischen Vereins des rhein.-westfäl. Industriebezirkes vom 26. IX. 1922.

Digitized by Google

Spannungsstößen beizumessen und deren Wirkungen auf ein unhomogenes mit Lufteinschlüssen, Schichtungen und dergl. versehenes Material, sind bei der Beschaffenheit des deutschen Porzellans unberechtigt.

46. Zement als Ursache der Sprengrisse.

Die Ursache an der verderblichen Sprengung der Scherben erklärt sich auf Grund der Beobachtungen aus der natürlichen Veranlagung des Porzellankitts. Vergleichende Untersuchungen haben ergeben, daß der Wärmeausdehnungskoeffizient des Zementes das Mehrfache desjenigen vom Porzellan beträgt. Infolgedessen, so schließt man, kann das Porzellan auf die Dauer bei wechselnden Temperaturen den Druck des Zementes nicht mehr ertragen und muß brechen[1]).

Um diese Erscheinungen zu beheben, hat man elastische Schichten, wie Hartpapier, Kork, ferner Weichmetalleinlagen und dergl. bei der Verkittung von Stütz- wie Hängeisolatoren angebracht. Jedoch ohne wesentlichen Erfolg. So haben z. B. Bleieinlagen doppelt geschadet[2]). Auch pflegen solche Schichten ebenso wie Magerungen die Festigkeit des Isolators erheblich zu verringern.

Von Forschern, die sich mit der Frage der Zerstörung von Porzellanisolatoren befaßt haben, nenne ich Petersen[3]), O. E. Meyer[4]), Benischke[5]), Gilchrist[6]), Peaslee[7]), Ryan[8]), G. Klingenberg[9]), E. Donath[10]), Endell[11]), W. Prehm[12]), G. Schendell[13]), E. Rosenthal[14]), F. Singer[15]), K. Laurell[16]), ohne deren Zahl erschöpft zu haben.

Von fast sämtlichen Beteiligten wird festgestellt, daß der Zementkitt verantwortlich ist für das Zerspringen der Isolatorteile. Es wurde deshalb von einer Anzahl Firmen dahin gearbeitet, daß der Zement durch geeignete Beimischungen einen Wärmeausdehnungskoeffizienten

---

[1]) Patentanmeldung P. 40728 Kl. 80.
[2]) Meyer, O. E., ETZ 1919, Heft 16, S. 178.
[3]) Vortrag auf der Jahresversammlung des V. D. E. 1918.
[4]) l. c.
[5]) ETZ, 25. IX. 1919 und ETZ 1920, S. 37.
[6]) Proceedings A. I. E. E. 1918, S. 571.
[7]) A. I. E. E. 1920, S. 445.
[8]) Electrical World 1920, S. 1479.
[9]) ETZ 1920, S. 632.
[10]) ETZ 1919, Heft 45.
[11]) „Zement" 19, Nr. 52.
[12]) bisher unveröffentlicht.
[13]) Mitt. d. V. d. E. W. 1918, Nr. 229, ferner 1920 vom 29. April; 1921 vom 11. Februar.
[14]) ETZ 1919, Nr. 49, S. 642.
Ders. Hochspannungsisolatoren. Springer 1921.
[15]) Charlottenburg, Keram. Ges. 1921.
[16]) Teknisk Tidskrift Elektrotechnik, Stockholm 1915. Heft 3.

Digitized by Google

erhält, welcher mit dem des Porzellans möglichst übereinstimmt. Man setzt deshalb neutrale Stoffe wie Quarz zu und magert so den Zement.

Andere Hersteller von Hochspannungsisolatoren paraffinieren die Innenflächen und geben den Außenflächen des Kittes außerdem noch einen Lacküberzug, damit der Zement keine Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen kann. Letzteres hat aber ebenfalls wenig Erfolg gehabt.

Alle derartigen Maßnahmen zur Korrigierung der Eigenschaften des Zementes darf man getrost als Angstkinder bezeichnen.

Ein unbedingt zuverlässiges Verfahren, Porzellanisolatoren mit Zement zu verkitten, haben wir nach Angabe der Zentralenleiter bisher nicht.

47. Das Verfahren von Creighton und Hunt.

Eine Methode, welche mit der Lackierung der Zementflächen Ähnlichkeit besitzt, schlagen die Amerikaner Creighton und Hunt[1]) vor. Nach ihren Versuchsergebnissen hat das von ihnen eingeschlagene Verfahren einen vollen Erfolg, so daß sie ihre Arbeit als eine Lösung des Porzellanisolatorproblems bezeichnet haben. Sie sehen als Ursache der Sprengrisse ebenfalls den Zementkitt an. Trocknet dieser aus, zieht sich die Masse zusammen. Saugt er infolge seiner durch und durch porösen Beschaffenheit Feuchtigkeit aus der Luft an oder hydratisiert er mit Hilfe des in ihm befindlichen Wassers, so dehnt er sich aus. Die bei jedem Wechsel des Feuchtigkeitgrades größer werdende Ausdehnung der Kittschicht ruft dann nach ihrer Ansicht den Bruch des Porzellans hervor.

Als Porzellanmasse für ihre Isolatoren verwenden sie einen guten hartgebrannten, nicht porösen Scherben.

Da eine bloße Lackierung der Kittflächen nicht zum gewünschten Ziel geführt hat, gehen Creighton[2]) und Hunt derart vor, daß der fertige Isolator nach Abbindung des Zementkittes in eine Lösung von Paraffin oder Pech gebracht wird. Dabei kann man sich der Mithilfe von Wärme, Vakuum und Kompression bedienen.

Um die Verhältnisse in der Praxis nachzuahmen, haben Creighton und Hunt derart imprägnierte gekittete Isolatoren auf den Kranz eines Rades angebracht, welches man fortlaufend durch eiskalte und 120 Grad heiße, durch trockene und feuchte Räume langsam hindurchschickte. Nach einigen tausend Umdrehungen konnten keine Zerstörungen an den Isolatoren wahrgenommen werden, ebensowenig nach abwechselndem Eintauchen in eiskaltes und kochendes Wasser.

---

[1]) Creighton, E. E. F. und F. L. Hunt, Eine Lösung des Porzellanisolatorproblems. A. I. E. E. Bd. 40, S. 480.

[2]) Creighton, Elmer E., General Electric Co., Am. Patent 1360896.

Digitized by Google

Dasselbe günstige Ergebnis wurde bei einem Versuch in einem Zentralennetz festgestellt, indem in der Nähe der Meeresküste 1100 nach vorliegender Methode behandelte Isolatoren mit 3600 nichtimprägnierten gleichen Isolatoren unter denselben Betriebsbedingungen verglichen wurden. Nach Verlauf eines Jahres waren von der letzten Sorte $13^1/_2$ % durch Sprengrisse zerstört, dagegen waren sämtliche mit Imprägniermitteln behandelten Isolatoren unbeschädigt geblieben. Dieser Zustand erhielt sich auch noch in dem darauffolgenden Jahr, indem die Mängel an den nicht vorbehandelten Isolatoren weiter zunahmen.

Die Versuchsansteller geben selbst zu, daß die beobachteten Zeiten noch nicht hinreichend sind, um endgültig ein Urteil auszusprechen. Im übrigen läßt sich bei einer Kritik der Creighton und Huntschen Prüfmethode einwenden, daß der wichtigste Faktor bei der Hydratation des Zements, die Zeit, keine Berücksichtigung findet. Die Erhärtung hat eine langsame Entwickelung zur Voraussetzung.

Kurz erwähnt werden soll hier noch der Vorschlag von John S. Lapp[1]), welcher das Springen der mit Zement gekitteten Porzellanisolatoren dadurch abstellen will, daß er die zusammengesetzten fertigen Teile hohen Dampftemperaturen aussetzt.

Nach den bisher vorgenommenen Feststellungen läßt sich aber der Zement durch Dampfhärtung nicht porenfrei machen, ebenso kann auf diese Weise eine dauernde Gleichgewichtslage nicht hergestellt, d. h. sein Weiterarbeiten durch Feuchtigkeitsaufnahme nicht verhindert werden.

48. Der Zement.

Betrachtet man den Zement seinen chemischen Eigenschaften nach, so muß man auch heute noch sagen, daß wir über die Konstitution sowie über die Hydratation und deren Verlauf, also der Festwerdung bei Wasserzusatz, nicht im einzelnen unterrichtet sind.

Unter hydraulischem Zement verstehen wir ein Kalksilikat mit Tonerdegehalt und sonstigen Zusätzen. Er wird durch Brennen gewonnen, fein gepulvert und im Baugewerbe mit Wasser unter Hinzufügung von grobem Kies zum Erhärten gebracht. Wer mit Zement, besonders für feinere Zwecke wie z. B. Verkitten von Porzellanteilen, gearbeitet hat, weiß, daß man in der Behandlung desselben mit dem Lernen nie fertig wird. Dies kommt auch dadurch zum Ausdruck, daß in der Literatur die widersprechendsten Angaben über die Behandlung von Zement enthalten sind. Zu einem Teil ist hieran mit schuld, daß man den Zement nicht aus genau gleichen Rohstoffen herstellt, ebenso nicht nach immer gleichen Verfahren. Bei der Anfertigung von festen Körpern

[1]) Lapp, John S., Am. Patent 1170287.

Digitized by Google

aus Zement durch Wasseranlagerung ist richtig, sich nur auf eigene Vorprüfungen zu verlassen.

Wenn man aus Portlandzement hartwerdende Kitte anfertigen will, so spielt der Wasserzusatz, die Art des Wassers, die Temperatur, die Zusätze, der Grad der Mischung, die Lagerung der angerührten Masse und vielerlei anderes eine für das gute Gelingen der Sache außerordentlich wichtige Rolle. Vor allem ist aber die jeweilige Beschaffenheit des Zementes selbst für den entstehenden Kitt und dessen Brauchbarkeit bestimmend.

Eine geeignete Mischung von Portlandzement und Wasser pflegt nach 3 bis 10 Stunden abzubinden. Dieser Abbindung schließt sich dann der sogenannte Erhärteprozeß an, welcher der Hauptsache nach innerhalb 4 bis 6 Wochen beendet ist, aber sich dann in kleinerem Maßstabe noch jahrelang weiter vollzieht.

Wenn man also zwischen die Porzellanscherben einen Zementbrei schüttet, so ist zu berücksichtigen, daß der chemische Umlagerungsprozeß, wenn er auch nach 4 bis 6 Wochen scheinbar vollendet ist, sich doch immer noch weiter vollzieht und dem Kitt im Laufe der Zeit andere Eigenschaften verleiht.

Dabei ist beachtenswert, daß erhärteter Zement durch und durch porös ist. Er steht daher auch in seinem Inneren mit der Feuchtigkeit und der Kohlensäure der Luft in ständiger Wechselwirkung. Nimmt man an, daß das unglasierte Porzellan der Innenflächen, wie dies in Amerika teilweise zutrifft, porös ist, so nimmt der Isolator durch eine wasserhaltige Zementschicht ebenfalls Feuchtigkeit auf und gibt zu Mängeln Anlaß.

Aus dem Untersuchungsmaterial über die Rissebildungen geht hervor, daß die mit Zement gekitteten Isolatoren im allgemeinen in der ersten Zeit keine Zerstörungserscheinungen aufweisen. Erst später beginnt das Zerspringen der Scherben. Die Einwirkung verschiedener Temperaturen auf den Kitt war aber von Anfang an vorhanden. Oder es waren, wie bei den in Kellern verpackt liegenden Sendungen von Porzellanisolatoren, die aber ebenfalls rissig wurden, überhaupt keine Temperaturschwankungen vorhanden.

Für die Zerstörung der Porzellanteile können daher nur intramolekulare Umsetzungen, also das Weiterarbeiten des Zements, d. h. die Umlagerung in andere Silikate, als schuldiger Teil angesehen werden.

Erhärtet der Zement, so schwindet er oder er dehnt sich aus je nach Zeit, Mischungsgrad und Feuchtigkeitsgehalt. Ebenso verändert er bei Temperaturschwankungen sein Volumen wie jeder Stoff. Je stärker die Kittschicht ist, um so größer wird natürlich räumlich seine Ausdehnung, wobei man zu berücksichtigen hat, daß abgebundener Zement wenig elastische Eigenschaften besitzt und Kräfte entwickelt, welche über die mechanische Festigkeit des Porzellanscherbens hinaus-

Digitized by Google

gehen. Die Feuchtigkeit welche sich im Inneren der porösen Kittmasse befindet, ergibt mit dem Zement im Laufe der Jahre ein fast unnachgiebiges hartes Gebilde und sprengt, vielleicht unterstützt durch Temperaturwechsel, das Porzellan.

Hat man durch Magerungsmittel, z. B. Quarzzugabe, den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kitt und Porzellan annähernd gleich gemacht, so dehnt sich trotzdem der Zementkitt unter großer Kraftentfaltung aus und sprengt den Porzellanscherben, wenn sich die Feuchtigkeitsverhältnisse ändern.

Der poröse unter Umständen sehr harte und unelastische Zement ist also ein Körper, dessen Volumen von der Feuchtigkeit der Umgebung abhängig ist.

Wird der Zement durch die Bindung des Wassers gut trocken, was z. B. in der Kopfgegend des Isolators eintreffen kann, so bildet er äußerst scharfe Kanten. Auch kann man sich leicht vorstellen, daß die scharfen kristallinen Zementbestandteile die Porzellanmasse ritzen wie der Diamant das Glas.

G. Schendell[1]), welcher die Rissebildung der gekitteten Porzellanisolatoren betriebstechnisch eingehend untersucht hat, kommt zu dem Ergebnis, daß eine Zusammenwirkung verschiedener Einflüsse die Veranlassung zu den entstehenden Schäden ist. Als solche bezeichnet Schendell: Ungünstige Massenverteilung, scharfe Formen von Kittfläche und Rillen, zu starke Kittschichten, unsymmetrische Aufkittung, Unterschiede in den Wärmeausdehnungszahlen von Porzellan und Kitt und vor allen Dingen die Unelastizität des Kittes nach dem Abbinden. Die erst im Laufe der Jahre vor sich gehende Verhärtung des Zements bis zur völligen Unnachgiebigkeit wird hier als Grund angesehen, daß die Sprengungen z. T. erst nach 3 bis 5 Jahren zustandekommen.

Auf Veranlassung G. Schendells ließ man in einer großen Überlandzentrale Norddeutschlands die Scherben der gesprungenen Porzellanisolatoren unter den Masten liegen. Es wird dort kaum ein Leitungsmast anzutreffen sein, der frei von solchen Trümmern ist.

Daß man für den vorliegenden Zweck der Verkittung natürlich keine „Treiber" verwendet, also einen Zement, der infolge übermäßigen Gehalts an Magnesiumsalzen zu einem Zerfall der Masse Veranlassung gibt, ist selbstverständlich. Zum Verkitten kommt nur ein guter Mittelbinder in Betracht, welcher den Zementnormalien entspricht.

49. Das Verschmelzen des Zements.

Die Frage der Herstellung von rissefreien Hochspannungsisolatoren wird demnach lauten: Wie kann man zu einem Zementkitt gelangen,

[1]) l. c.
Ders., Die Aufteilung ausgedehnter Mittelspannungsnetze. ETZ 1923, H. 39.

Digitized by Google

der nach 4 bis 6 wöchentlichem Lagern fest wird und alsdann mit Sicherheit sein Weiterarbeiten einstellt, also durch Feuchtigkeitseinflüsse sowie durch die Kohlensäure der Luft keinerlei Veränderungen mehr erleidet, und außerdem eine gewisse Nachgiebigkeit besitzt.

Hierüber liegen folgende Untersuchungen vor[1]). Setzt man einem nach Eigenschaften geeigneten Zement die fürs Abbinden günstige Menge Wasser zu, und fügt man weiterhin eine bestimmte Menge von einem wasserabweisenden Material in gepulvertem Zustande bei, welches einen nicht zu hohen Schmelzpunkt besitzt, so bildet sich nach 4 bis 6 Wochen aus dieser Kittmasse ein harter Körper.

Pulvrige Materialien, die sich für derartige Mischungen mit dem Zement benutzen lassen, sind künstliche und natürliche Harze, Bitumen, Peche, Kohlenwasserstoffe, Schwefel, Asphalt und verschiedene ähnliche Stoffe. Diese Beimengungen hindern den Zement nicht, vollständig fest zu werden, denn sie sind nichts weiter wie ein neutrales Füllmittel. Sie sind aber infolge ihres colloidfeinen Zustandes und einer guten Vermischung überall in der abgebundenen Zementmasse verteilt. Der hartgewordene Kitt enthält also in allen seinen Bestandteilen ganz gleichmäßig feinste Asphaltpartikelchen eingeschlossen. Die Zementart und das Schmelzmittel sind natürlich einander je nach ihren besonderen Eigenschaften anzupassen.

Wenn man nach der Verkittung der Porzellanscherben zunächst den Zement abbinden und alsdann 4 bis 6 Wochen erhärten läßt, so hat sich damit eine mechanisch feste Verbindung der Porzellanteile vollzogen. Es ist aber damit der Zementmasse noch nicht die Fähigkeit genommen, den chemischen Umwandlungsprozeß weiter zu vollziehen, sich dabei auszudehnen und den Porzellanscherben zum Reißen zu bringen.

Deshalb werden die gekitteten Isolatoren nunmehr der Wärme ausgesetzt. Man benutzt Temperaturen, bei denen der Schmelzkörper erweicht und flüssig wird. Ist der letztere z. B. Asphalt, so dehnt er sich beim Schmelzen aus, die feinen Asphaltteilchen dringen in die beim Abbinden und Erhärten des Zementes entstandenen Poren und umlagern die steinigen chemisch wirksamen Bestandteile in vollständiger Weise. Nach der Abkühlung ist aus dem vorher porösen Steinkitt eine homogene Schicht entstanden, bei der jede Umlagerung der Zementmoleküle in anders zusammengesetzte Silikate, d. h. ein Treiben des Kitts, absolut ausgeschlossen ist. Den Beweis hierfür liefert die Untersuchung mit Hilfe hochgespannter Ströme. Auch nach 24stündiger Wasserlagerung ist eine Dissoziation von Kittbestandteilen nicht nachweisbar.

---

1) Bültemann, Dr. A., D. R. P. 381874. Engl. Pat. 167520, Am. Pat. 1440003 und sonstige Auslandspatente.

Digitized by Google

Man hat es in der Hand, der Zementmischung noch sonstige Stoffe beizumengen im Hinblick auf den Einfluß des elektrischen Feldes, z. B. Grafit oder eine Substanz zur Veränderung der Dielektrizitätskonstanten. Auch Metallisieren der Kittflächen kann unter Umständen vorteilhaft sein.

Der fertige Kitt nach dem Abbinden, Erhärten und Verschmelzen hat das spezifische Gewicht von ungefähr 1,9 bis 2,1. Die Prüfung verschmolzener Zemente nach monatelanger Lagerung im Freien, auch während der Wintermonate, zeigt, daß keine Feuchtigkeitsaufnahme stattgefunden hat. Die elektrolytische Natur der Zementmasse ist völlig verschwunden.

Prüft man den Kitt nach der Einwirkung von Wasserdampf bei 100 Grad, so stellt sich heraus, daß auch hier eine Feuchtigkeitsaufnahme praktisch nicht mehr meßbar ist.

Bei der Verwendung eines solchen Kittes für die Zusammensetzung der Porzellanscherben kommt ferner noch als wichtiger Umstand in Betracht, daß infolge der Beimengung nachgiebiger Stoffe, wie z. B. Asphalt, eine Kittsubstanz von elastischer Eigenart entsteht. Man vereinigt auf diese Weise den mineralischen Charakter des steinigen porösen Zements mit der bituminösen dichten Natur des Poren ausfüllenden, chemisch fast unangreifbaren, bei Temperaturschwankungen nachgiebigen Pechs.

Die Ausdehnung der vorliegenden Kittmasse bei steigenden Wärmegraden, welche allen Stoffen eigentümlich ist, geschieht hier mit einer Kraftentfaltung, die mit nur geringer Stärke auftritt. Denn das Schmelzmittel, welches z. T. aus bei niedrigen Temperaturen weich werdenden Stoffen zusammengesetzt ist, ist sowohl leicht ausdehnungsfähig als auch leicht komprimierbar, es paßt sich wie eine elastische Zwischenlage den Beanspruchungen an.

Pech ist bekanntlich ein Körper, der trotz scheinbarer Sprödigkeit schon bei geringer Druckwirkung „fließt“ und sich ganz nach seiner Beanspruchung verschiebt.

Auf die bisher beobachtete gleichmäßige Stärke sowohl der Kittschichten wie auch der Porzellanteile braucht man daher nicht mehr die früher notwendige Aufmerksamkeit zu richten.

Die mechanische Festigkeit des verschmolzenen Zementkitts ist erheblich größer wie die des erhärteten, ungemagerten oder gemagerten, Zements. Man kann sich dies in der Weise erklären, daß infolge der Erwärmung des Zements (beschleunigte Hydratation) und der dann sofort erfolgenden Durchdringung des Steingerippes mit dem geschmolzenen Asphalt der Kitt homogener geworden ist. Bei richtiger Mischung und Verschmelzung bricht eher der Porzellanscherben oder die Metallarmatur, als daß der Klöppel herausgezogen wird. Bei Kappenisolatoren liegt die Grenze um 5000 kg herum, bei den gewöhnlichen Abspannisolatoren rund 2000 kg höher.

Digitized by Google

Geeigneter Kitt und entsprechend gewählte Konstruktion der Porzellanteile erhöhen die Festigkeit der zusammengesetzten Isolatoren noch erheblich mehr, falls die gewünscht wird.

Es ist auch versucht, für das Erhärten des Zements z. B. die Kappenisolatoren nicht 4 bis 6 Wochen liegen zu lassen, sondern bereits vorzeitig nach 7 oder 9 Tagen den Zement mit Asphalt zu verschmelzen. Die erzielte Reißfestigkeit war dann nicht so groß wie vorher. Die Klöppel kamen bei 3 400 bis 4 000 kg heraus, also bei Werten, die immerhin noch weit über doppelt so hoch sind, als die V. D. E.-Vorschriften verlangen. Die Kittmasse erwies sich als undissoziierbar.

Ein Vorzug, welchen die Keramiker anerkennen, besteht bei dem mit Asphalt verschmolzenen Zementkitt darin, daß er sich gleichmäßiger an die Porzellanwände anlegt, als dies reiner oder mit Quarz versetzter Zement tut. Ein derartiges Polster kommt z. B. bei den Kugelkopfisolatoren[1]) in Frage. Das Porzellan wird dann nicht so stark beansprucht, d. h. der Scherben springt bei Belastung weniger leicht, ebenso wird die elektrische Festigkeit erhöht.

Der zusammengesetzte Porzellanisolator, bestehend aus den Porzellanscherben, Metallteilen, Zement und Pechzusatz, wird beim Schmelzprozeß einer Temperatur von ungefähr 150° C ausgesetzt. Infolge des Ausschaltens der Einwirkung von Feuchtigkeit auf Zement vollziehen sich die Raumveränderungen der Körper entsprechend den Kräften, welche bei der Temperaturänderung der Bestandteile entfaltet werden. Selbst wenn Pech nicht nachgiebig wäre — was aber der Fall ist — ist die Kombination des mehrteiligen Isolators durch die Erhitzung infolge der vorhergehenden Pechverschmelzung auf weit mehr als die in Frage kommende Betriebserwärmung eingestellt, eine Zerstörung durch Temperaturschwankungen ist daher nicht möglich.

Mit Asphalt verschmolzener Zement sieht dunkel bis schwarz aus. Ein Wassertropfen bleibt darauf stehen, bis er verdunstet. Auf erhärtetem gemagerten oder ungemagerten Zement wird er sofort von der Masse eingesaugt.

Die Verbraucher sind in letzter Zeit infolge der Unzuverlässigkeit des Zements mehrfach zur Verwendung von einteiligen oder zusammenglasierten Isolatoren übergegangen, obgleich die mechanische und elektrische Festigkeit gegenüber den zusammengekitteten zu wünschen übrig läßt. Im Hinblick auf die Sprengrisse erscheint den Zentralenleitern dies jedoch als das kleinere Übel.

Gewährleistet der Kitt die Anfertigung betriebssicherer Isolatoren aus Einzelteilen, ist dies deshalb sehr wertvoll. Wenn wir über einen

[1]) Eine von F. Scheid herrührende Konstruktion. Ein neuer Hängeisolator. ETZ 1921, S. 1323.

Digitized by Google

Kitt verfügen, der uns die Möglichkeit einer einwandfreien Vereinigung beliebiger Porzellanstücke sichert, dann kann der Konstrukteur von Hochspannungsisolatoren und Durchführungen erheblich mehr Rücksicht auf die mechanischen und dielektrischen Eigenschaften seines Scherbens nehmen. D. h., er ist in der Lage, Isolatoren aus Porzellanteilen kleinerer Dimensionen zusammenzusetzen, die betriebssicherer sind, wie wir sie jetzt haben.

Denn, wie schon angegeben wurde, fällt der Porzellanscherben infolge Verschiedenheit des Satzes, der Brenntemperatur, der Brennzeit, der Dauer der Abkühlung usw. trotz aller Bemühungen noch immer in bezug auf elektrische und mechanische Eigenschaften um so ungleichmäßiger aus, je größer das Stück ist. Bei der Prüfung hat man daher z. Z. noch viel gebranntes Gut auszuscheiden. Es wird also die Frage entstehen, ob es technisch und wirtschaftlich aussichtsvoll ist, die Isolatoren für Höchstspannungen aus noch mehr wie bisher, aber elektrisch besseren Einzelteilen zusammenzusetzen.

In letzter Zeit sind eine ganze Anzahl Vorschläge für sogenannte „kittlose" Isolatoren entstanden, bei denen der Klöppel durch eine Metallkonstruktion im Porzellan festgehalten wird[1]). Da man Metall und Porzellan wegen der Ungenauigkeit der Masse nicht ohne weiteres verbinden kann, braucht man eine nachgiebige Zwischenlage. Auch ist in vielen Fällen ein Ausgießen des Isolierkopfes erforderlich, um die nötige Sicherheit herbeizuführen.

E. Altmann[2]) gibt an, daß für die Kräfteübertragung genügend große Auflageflächen vorhanden sein sollen, und die Zwischenschicht eine gleichmäßige Zug- und Druckverteilung zuläßt. Ausgußmassen (Compounds) sind der dauernden Belastung wenig gewachsen. Am idealsten wäre für diesen Zweck der feinkörnige, alle Unebenheiten ausfüllende Zement, sofern er raumbeständig und nachgiebig herstellbar ist.

Daß der mit Asphalt verschmolzene Zement diesen Ansprüchen genügt, liegt auf der Hand. Es fragt sich aber, ob sogenannte kittlose Isolatoren überhaupt noch große Bedeutung haben, wenn die Verkittungsangelegenheit in zufriedenstellender Weise erledigt ist.

Man hatte die elastischen Zwischenlagen auch aus imprägnierten Geweben, z. B. geöltem Fasermaterial, gewählt. Aber in Freileitungsisolatoren, die jahrzehntelang halten sollen, ist derartig leicht verwitterndes Material nicht am Platze. Gerät Metall auf Porzellan, ist die Zerstörung des Isolators unaufhaltbar. Auch wegen der entstehenden Schrammen sinkt die elektrische Festigkeit erheblich.

Die Verwendung immer höherer Spannungen in den Kraftübertragungen erfordert ständig größer werdende Isolatortypen.

[1]) Konstruktionen von A. Vaupel, W. Schmidt-Selb, O. Becker-Hennigsdorf u. a.

[2]) Altmann, Dr. E., Der Kegelkopfisolator. El. Be. 1923, Heft 16, S. 187.

Digitized by Google

50. Das Schmelzverfahren im Vergleich zum Imprägnierverfahren.

Vergleicht man die von Creighton und Hunt vorgeschlagene Methode mit dem Verschmelzungsverfahren, ist in Betracht zu ziehen, daß man die Treiberscheinungen des Zements durch äußere Imprägnierung nicht unterbinden kann, da sich die steinige Masse von außen her nicht vollständig durchdringen läßt, und die innere Arbeit des Zementes weitergeht, weil stets Wasserreste im Inneren der Kittmasse vorhanden sind. Durch Imprägnieren kann nur ein vorübergehender Zustand geschaffen werden, wie es beim Lackieren der Außenflächen mitunter auch der Fall war. Auf die Dauer hält eine Imprägnierung, welche von der Oberfläche aus stattfindet, nicht stand. Hinzu kommt, daß das Verfahren von Creighton und Hunt für die Praxis viel zu umständlich und daher zu teuer ist.

Die physikalischen und chemischen Unterschiede des mit Asphalt verschmolzenen Zementkitts im Vergleich mit einem Zement, der bloß durch eine dünne Trennwand von der Luftfeuchtigkeit abgesperrt, im übrigen aber reiner Zement mit allen ihm eigentümlichen Eigenschaften geblieben ist, sind hinreichend ersichtlich aus den Ausführungen der vorigen Kapitel [1]).

51. Der Zellstoff.

Von den Rohmaterialien, die zur Herstellung von elektrischen Isolierstoffen dienen, nimmt der Zellstoff von Tag zu Tag eine immer mehr zunehmende Bedeutung ein, vor allem in seiner Form als Papier.

In der Natur kommt der Zellstoff, auch Zellulose genannt, vor als ein wesentlicher Bestandteil der Zellenwände aller Pflanzen, wo er gewissermaßen das Gerüst zum Aufbau derselben darstellt und sich bei dem sogenannten Verholzungsprozeß ablagert. Der Zellstoff ist in diesen Gebilden jedoch nicht rein erhalten, sondern vermengt mit verschiedenartigen anderen Substanzen wie Harzen, Färbemitteln, eiweiß- und stärkehaltigen Körpern, Fetten usw. Der chemischen Zusammensetzung nach ist Zellulose ein Mehrfaches von $C_{12}H_{20}O_{10}$, also aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff zusammengesetzt, isomer mit Stärke und Dextrin.

In Wasser und Alkohol ist der Zellstoff nicht löslich, wohl aber unter Aufquellen in Kupferoxydammoniaklösung, aus welcher er sich wieder gallertartig abscheidet, wenn Säuren, gelöste Alkalien oder Zucker hinzugefügt werden. Wäscht man den gallertartigen Niederschlag mit Alkohol aus, so erhält man den Zellstoff als ein weiches amorphes Pulver.

---

[1]) Siehe die neu herausgekommene Arbeit von Dr. E. Rosenthal und Dr. H. Luftschitz, Die Lösung des Kittproblems im Isolatorenbau. Rosenthal, Mitteilungen, Heft 3. Erscheint auch gekürzt in der ETZ u. a.

Digitized by Google

Um aus Baumwolle reine Zellulose herzustellen, verfährt man zur Entfernung der inkrustierenden Teile so, daß man die in Form von Watte befindliche Baumwolle nacheinander mit verdünnter Kalilauge, verdünnter Schwefelsäure, Wasser, Alkohol und Äther behandelt. Es ergibt sich dann auch hier die Zellulose als amorpher Rückstand, frei von seinen verunreinigenden Beimengungen.

Als technisch reinen Zellstoff kann man das sogenannte schwedische Filtrierpapier ansehen.

Der reine Zellstoff wird an der Luft nicht verändert. In der Pflanze jedoch, vor allem im Holz, wo er mit stickstoffhaltigen Substanzen zusammenkommt, tritt langsamer Zerfall ein infolge von Oxydation.

In konzentrierter Schwefelsäure quillt der Zellstoff auf. Man taucht deshalb ungeleimtes Papier aus Zellulose kurze Zeit in kalte konz. Schwefelsäure, wäscht mit Wasser aus und erhält eine Art vegetabiles Pergament, das dem aus Tierhaut gewonnenen sehr ähnlich ist.

Durch Salpetersäureeinwirkung auf Zellstoff entstehen die Nitrozellulosen, welche zu Schießbaumwolle und mit Kampfer zu Zelluloid verarbeitet werden. Das Zelluloid hat früher dann und wann in der Elektrotechnik als Isoliermaterial Verwendung gefunden, es ist aber für diese Zwecke nur noch selten anzutreffen, da es explosiv und feuergefährlich ist. Als bruchsichere Gefäße für Bleiakkumulatoren und dergleichen wird es mitunter noch benutzt.

Durch Behandlung mit Essigsäure entstehen die Azetylzellulosen, welche für hoch isolierende feste Körper als auch auf Isolierlacke hin verarbeitet werden. Solche Dielektrika, Zellone genannt, sind Gegenstand des Aufsatzes von A. Eichengrün, S. 311.

Baumwolle, Hanf und Leinen besitzen einen hohen Gehalt an Zellulose, während Holz und Getreidestroh in erheblichem Umfange mit anderen Beimischungen verunreinigt sind. Aber gerade aus den letzteren beiden wird technisch in großen Mengen der Zellstoff hergestellt.

52. Technische Gewinnung von Zellstoff.

Man gelangt auf mechanische Weise durch eine Art Reibungsprozeß zu fein verteilten Holzteilchen, welche einer Faser ähnlich sind. Es ist dies der sogenannte Holzschliff, welcher jedoch für Zwecke der elektrischen Isoliertechnik wenig brauchbar ist, weil er alle im Holz befindlichen Unreinigkeiten beibehält und keine einheitliche richtige Faser abgibt. Man verwendet für Holzschliff meistens Nadelhölzer wie Fichte und Tanne, mitunter Kiefer.

Die Gewinnung von reinem Zellstoff aus Holz geschieht auf chemische Weise in größtem Maßstabe nach dem Sulfitverfahren. Das in Stücke zersägte Fichtenholz wird von den harten Ästen befreit und unter Druck von mehreren Atmosphären einige Stunden lang bei

Digitized by Google

120—150° in eisernen Kesseln mit einer Lösung von saurem schwefligsaurem Kalzium oder mit schwefliger Säure gekocht. Die Zellulosefabriken stellen sich ihre Lösungen zum Aufschließen des Holzes selbst her, indem sie in hohen mit Kalkstein gefüllten Türmen, welche von oben mit Wasser berieselt werden, schweflige Säure aufsteigen lassen. Auch durch Einleiten von schwefliger Säure in Kalklösungen kann man eine brauchbare Kochflüssigkeit erzielen. Die verunreinigenden Beimengungen im Holz, wie Harze und anorganische Substanzen, werden durch eine Art Hydrolyse in Lösung oder Suspension gebracht. Die Zellstoffmasse aus dem Kocher muß sorgfältig ausgewaschen werden.

Man läßt dann den Brei über Pappenmaschinen gehen, wobei ein entwässertes Produkt von ungefähr 50% Feuchtigkeit entsteht. Unter Umständen treibt man die Entwässerung auf Trockenzylindern noch weiter. Die Zellulose in diesem Zustande ist Handelsware.

Aus Stroh wird der Zellstoff nicht unter Benutzung eines sauren schwefligsauren Kalziumsalzes gewonnen, sondern man wendet hier eine Alkalilösung an, vornehmlich kaustische Soda. Das zu Häcksel zerschnittene Stroh wird in eisernen drehbaren Birnen bei 8—10 Atm. gekocht. Es gehen bei diesem Aufschließungsverfahren Harze und Kieselsäure in Lösung. Nach dem Auswaschen wird die Stroh-Zellulose ebenfalls zur besseren Handhabung in feuchte Pappen übergeführt. Die Faser des Strohstoffs ist länger und wertvoller wie die von Holz-Zellulose.

53. Herstellung von Papier für elektrische Isolierzwecke.

Für die Verwendung zu elektrischen Isolierzwecken führt man den Zellstoff zunächst in Papier über. Hier tritt die Frage auf, ob es erlaubt ist, den Zellstoff zu leimen, oder ob man ein leimloses oder nur wenig geleimtes Papier auf Dielektrika hin verarbeitet. Dies kommt ganz darauf an, was für Isolierstoffe erzeugt werden sollen. Jedenfalls ist es für die Verwendung als Isoliermaterial von Wichtigkeit, wie die Papiere, was ihre Leimung betrifft, aufbereitet sind.

Die Herstellung von isoliertechnisch geeignetem Papier aus Zellstoff geschieht folgendermaßen.

Man suspendiert den Zellstoff im Holländer in viel Wasser und fügt je nach Art des anzufertigenden elektrischen Isoliermittels Hadernstoff oder Baumwollfasern oder die aus der Bastfaser des Bananenbaumes gewonnene Manilahanffaser in entsprechendem Verhältnis zu, sofern man nicht überhaupt reine Holz- oder Strohzellulose benutzt. Auch Asbest ist als Faserzusatz möglich, natürlich nur in mechanisch fein aufgeschlossenem Zustand. Besonders die Manilafaser zeichnet sich durch Festigkeit aus. Soll Leimung des Papiers erfolgen, wendet man für diesen Zweck z. B. Harzleim an, welcher aus Kolophonium mit Hilfe von schwefelsaurer Tonerde ($Al_2(SO_4)_3 + 18\,H_2O$) bereitet

Digitized by Google

wird. Aus harzsaurem Natron und Aluminiumsulfat entsteht eine Verbindung, welche $^1/_3$ und mehr freies Harz enthält.

Es ist unter Umständen zweckmäßig, Füllmittel, wie fein verteilte anorganische Körper, dem für elektrische Isolierstoffe zu verarbeitenden Papier hinzuzufügen. Bei der späteren Oberflächenbehandlung des Papiers kann ebenfalls eine Füllung stattfinden. Bestimmte allgemein gültige Regeln über die Mischung der Ausgangsstoffe lassen sich nicht geben, weil die Methoden zur Herstellung von elektrischen Isolierstoffen aus Papier und die Verwendung der gewonnenen Nichtleiter von Fall zu Fall verschieden sind, wie dies auch schon mehrfach betont wurde.

Der Holländerbrei wird über Papiermaschinen geführt, welche mit rotierenden Siebzylindern ausgerüstet sind, wo dann die Bildung des Papiers vor sich geht. Auf dieser Maschine findet die Entwässerung statt, zu gleicher Zeit geschieht durch dampfgeheizte Trommeln die Trocknung. Bei der Nachbehandlung in Kalandern und durch Satinieren werden hochstehende Fäserchen in die Masse eingedrückt und das Papier geglättet.

54. Chemische, mechanische und elektrische Papierprüfungen.

Zur Bestimmung der anorganischen Beimengungen nimmt man eine quantitative Glühprobe vor. Ferner hat man auf das Vorhandensein von Chlor und Säuren zu untersuchen, welche für isoliertechnische Zwecke außerordentlich schädlich sind. Sollte das Papier durch mechanisch hergestellte Holzfasern, also durch Holzschliff, verunreinigt sein, so erkennt man dies daran, daß die Masse durch Phlorogluzin $C_6H_3 \cdot (OH)_3$ und Chlorwasserstoffsäure eine rote Färbung annimmt. Die Festigkeit und Reißlänge untersucht man mittels der hierfür ausprobierten Materialprüfungsapparate. Der Wassergehalt wird durch Wägung einer Probe ermittelt, die ungefähr 10 Stunden bei 103° getrocknet ist.

Die Papiersorten sind sehr häufig auf elektrische Festigkeit hin untersucht worden. Es liegt ein umfangreiches Prüfmaterial in der Literatur vor, vor allem in der amerikanischen. Fast alle diese Feststellungen über den Wert der Durchschlagsfestigkeit sind aber dadurch gekennzeichnet, daß keine vergleichbaren Zahlen hinsichtlich der Güte der Papiere in dieser Beziehung erhalten wurden. Der Grund hierfür ist, daß bei diesen Messungen nicht die notwendigen einheitlichen Versuchsbedingungen eingehalten sind, und die verwendeten Elektroden beliebig ausgewählt wurden. Es ist dieser Übelstand bereits vorher besprochen worden. (Siehe Seite 181.)

In einer Arbeit über die Ermittelung der Durchlagsfestigkeit von hygroskopischen Isoliermaterialien, ausgeführt im Hochspannungslaboratorium der Karlsruher Hochschule, kommt A. Schwaiger[1]) zu dem Ergebnis, daß die Temperaturen zwischen 15—20° kaum merklichen

[1]) Archiv f. Elektrotechnik. III. Bd. 1915. 10/11. Heft.

Digitized by Google

Einfluß auf die Durchschlagsfestigkeit des Papiers ausüben, sondern daß es lediglich der Feuchtigkeitsgrad ist, welcher die elektrische Festigkeit bestimmt. Je mehr ungebundenes Wasser sich im Papier befindet, um so mehr wird es leitend, und um so stärker erwärmt es sich dabei, bis die Zerstörung eintritt.

Untersucht man Papier, das aus einem trockenen Raum in einen mit mehr Feuchtigkeit erfüllten gebracht wird, so ergibt sich, daß infolge Wasseraufnahme des Papiers aus der Luft die Durchschlagsfestigkeit wesentlich heruntergeht. So wurde Papier von 0,45 mm Stärke aus einem Raum von 53% Luftfeuchtigkeit in einen solchen mit 90% Luftfeuchtigkeit übergeführt und dann die elektrische Festigkeit gemessen bei Benutzung der Elektroden: Kugel von 15 cm Durchmesser gegen Platte von 20 cm Durchmesser. Die Spannung wurde jede Minute sprungweise um 200 V erhöht. Anfangs sinkt die Durchschlagsspannung langsam, dann aber schneller und kommt nach $1^1/_2$ Stunden zu ihrem Endzustand. Zuerst betrug die Festigkeit 4200 V, am Ende war sie 2500 V bei Anwendung eines sinusförmigen Wechselstroms von 50 Per/sec.

Entsprechend der Empfindlichkeit des Papiers gegenüber wechselnden Feuchtigkeitsgraden seiner Umgebung ist es also in elektrischer Beziehung ein außerordentlich unsicheres Material. Papier ändert seine elektrische Festigkeit fortgesetzt, wenn die Luftfeuchtigkeit Schwankungen unterworfen ist.

Schwaiger hat festgestellt, daß bei einem Papier von 0,46 mm Dicke, welches vor jeder Prüfung 24 Stunden lang relativen Feuchtigkeiten von 10% bis gegen fast 100% ausgesetzt war, die Durchschlagsfestigkeit bei 10% Feuchtigkeit 5700 V beträgt, diese Festigkeit dann bei ansteigender Wasseraufnahme erst langsam, bei 40—60% Feuchtigkeit schneller und dann wieder langsam abnimmt, bis sie bei 95% Feuchtigkeit nur noch einen Wert von 1800 V ausmacht.

Bei diesen Ergebnissen spielen eine Anzahl Faktoren mit herein, welche auf die Durchschlagsfestigkeit des Papiers Einfluß ausüben. So läßt sich annehmen, daß bei wenig Feuchtigkeit in der Masse nur eine geringe elektrische Leitfähigkeit vorhanden ist, welche die Durchschlagsfestigkeit günstiger gestaltet. Es ist aber hierbei zu berücksichtigen, daß die auftretende Stromwärme trocknend auf das Papier einwirkt und den Einfluß des Wassergehalts abschwächt.

Bei den Untersuchungen des Papiers auf elektrische Festigkeit treten daher verschiedene Erscheinungen mit auf, welche zusammengenommen die Durchschlagsfestigkeit der Zellulosemasse beeinflussen.

Je länger das Papier mit hoher, allmählich wachsender Spannung belastet wird, um so mehr tritt zunächst Trocknung ein, steigt also die Durchschlagsfestigkeit. Es kann aber auch umgekehrt sein, indem

Digitized by Google

bei der elektrischen Trocknung Vorentladungen entstehen, welche den Zellstoff angreifen. Schwaiger hatte bei den zuletzt genannten Versuchen Papier von 0,2 mm Stärke und von 60% und 65% Feuchtigkeit verwendet. Bei direkt nassem Papier, z. B. einer Feuchtigkeit von 85%, sinkt die Durchschlagsfestigkeit beträchtlich, je längere Zeit man auf das Ansteigen der Spannung hingehen läßt, da durch die entstehende Wärme kein genügender Trockengrad mehr erreicht werden kann, und schon vorher die Zerstörung des Papiers eintritt.

Belastet man Papiere von größerer Dicke mit hohen Spannungen, so ändern sich die Verhältnisse noch insofern, als sich Schichten von verschieden hohem Feuchtigkeitsgehalt bilden, hervorgerufen teils durch veränderliche Außenfeuchtigkeit, teils durch die Wirkung der Stromwärme. Infolgedessen wird das Papier stellenweise einseitig stark belastet, die elektrische Festigkeit der ganzen Strecke ist daher geringer, als wenn das Papier überall den gleichen Feuchtigkeitsgrad besitzt.

Infolge der in der Literatur zutage tretenden großen Abweichungen bei den Papieruntersuchungen schlägt Schwaiger vor, die Versuchsanordnungen, unter welchen Papier auf seine Durchschlagsfestigkeit hin zu prüfen ist, genau festzulegen. Er wünscht vor allen Dingen die Angabe der Feuchtigkeit und Konstanz während des Versuchs, langsames Steigern der Prüfspannung, Anwendung der Elektroden Kugel gegen Platte. Unter diesen Bedingungen hat er bei Wiederholung der Prüfungen eine übereinstimmende Charakteristik des Papiers, was dessen elektrische Eigenschaften anlangt, festgestellt.

Sieht man sich die Endergebnisse der zahlreichen Untersuchungen, welche zur Erkenntnis des elektrischen Verhaltens von Papier vorgenommen sind, auf ihre technische Verwertbarkeit in elektrischer Beziehung hin an, so kommt man zu der Überzeugung, daß diese Papiersorten ein für die Praxis ganz unzuverlässiges Isoliermittel darstellen, weil ihre Eigenschaften stark von der umgebenden Luft abhängig sind, sich infolgedessen fortgesetzt ändern und keine dauernde Widerstandsfähigkeit besitzen.

Es läßt sich aber weiterhin aus dem Versuchsmaterial feststellen, daß die Zellulose selbst als Dielektrikum Vorzüge besitzt. Technologisch ist klar, wenn man sich die Zusammensetzung des Papiers vorstellt, daß die Verhältnisse in dielektrischer Beziehung gar nicht anders liegen können. Der Zellstoff ist ein faseriges Material, er zieht also Wasser an und gibt es ab, je wie seine Umgebung auf ihn wirkt. An der Oberfläche des Papiers vollziehen sich diese Änderungen mehr wie im Inneren. Das Papier besitzt also Schichten von verschiedener Feuchtigkeitsdichte.

Die Dielektrizitätskonstante der Holz-Zellulose ist rund 2. Nach C. Schwalbe beträgt die Dielektrizitätskonstante von Baumwollzellulose bei 20°: 6,7, bei 70°: 7,6. Diese Werte sind wahrscheinlich durch

Digitized by Google

den Gehalt an Wasser und Luft beeinflußt. Außer Wasser mit der spezifischen Kapazität 84 befinden sich im Papier, wie gesagt, noch Luft und Wasserdampf. Wir haben es hier also an und für sich mit schlechten Leitern zu tun. Aber infolge starker elektroosmotischer Wirkungen kann keine sichere Isolierfähigkeit zustande kommen. Die Fasern lockern sich auf, das elektrische Feld ist an vielen Stellen äußerst kraftvoll und betätigt sich dementsprechend.

In wässeriger Aufschlämmung wandert der Zellstoff zur Anode.

Auf die mechanischen Eigenschaften hat der Feuchtigkeitsgrad des Papiers ebenfalls einen großen Einfluß. Vergleicht man Papier, welches bei normaler Temperatur einer Feuchtigkeit von 100% ausgesetzt wurde, mit Papier, welches sich bei derselben Temperatur im Vakuum befunden hat, so stellt man fest, daß letzteres ungefähr 40% an mechanischer Festigkeit eingebüßt hat. Bei Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes ergeben sich ziemlich linear verlaufende Zwischenwerte.

55. Die Umwandlung des Papiers zum Dielektrikum.

Die Frage entsteht, was hat man zu tun, um das Papier zu einem technisch gebrauchsfähigen, haltbaren, mit dauernd gewährleisteten Eigenschaften ausgestatteten Isolierstoff umzuformen? Das elektrolytische Verhalten von reinem Zellstoff wird günstiger, wenn die Masse hinreichend ausgewaschen ist. Es kommt also darauf an, ein einheitliches Material von überall gleicher Dielektrizitätskonstanten zu schaffen. Man geht daher zunächst so vor, daß man das Papier trocknet und zwar bis zu demjenigen Grade, wo noch keine Zersetzung des Zellstoffs eintritt. Zu diesem Zweck kann man etwas über 100° Celsius hinaufgehen, auch Vakuum anwenden. Die Trocknung allein genügt aber noch nicht, wie wir vorher gesehen haben, weil das Papier in feuchter Luft sofort wieder Wasser annimmt.

Es muß also eine Verarbeitung der Zellulose mit einem Wasser abstoßenden und elektrisch hoch isolierenden, nicht dissoziierbarem Körper vorgenommen werden, der zu gleicher Zeit eine gewisse Elastizität besitzt. Als solche Körper bewähren sich hier die künstlichen und die natürlichen Harze, Peche, Holzteer, Steinkohlenteer, Kohlenwasserstoffe wie Paraffin, Wachs, Öle usw., sowie die verschiedenartigen Lacke.

Es gibt zwei Möglichkeiten der Herstellung. Entweder man wendet ein gut geleimtes getrocknetes Papier an und bestreicht dies mit den Imprägnierstoffen. Denn wird im Inneren des Papiers eine Schicht bleiben, die unter Umständen nur wenig von der Imprägnierung abbekommen hat.

Oder aber man benutzt ungeleimtes oder ganz wenig geleimtes getrocknetes Papier und füllt die Zellstoff-Faser, welche also das Gerüst darstellt, vollkommen mit der Harz- oder Pechlösung aus. Die Flüssigkeit, in welcher das wasserabweisende Bindemittel gelöst ist,

Digitized by Google

muß gänzlich wieder aus dem Papier heraus, sonst kann kein Höchstmaß von elektrischer Festigkeit erreicht werden. Bei Dauerbelastung mit hohen Spannungen ist es ein Zeichen von Schichtenbildung und schlechter Verdunstung der Lösungsmittel, wenn Blasen und Abhebungen entstehen.

Die Behandlung von Papier mit Paraffin hat in elektrischem Sinne große Vorteile. Paraffin gehört zu denjenigen Isolierstoffen, welche, wie wir früher erkannt haben, eine sehr hohe Oberflächenisolation mit einer großen Durchschlagsfestigkeit verbinden. Außerdem sind paraffinierte Papiere gegen chemische Einflüsse in hohem Maße widerstandsfähig. Paraffin hat auch nicht die nachteilige Wirkung, wie dies bei manchen Harzen der Fall ist, bei Gegenwart von Feuchtigkeit mit Metallen, z. B. Kupfer, zur Entstehung von Metallverbindungen Veranlassung zu geben. Es besitzt aber den Nachteil, daß es nur wenig Wärme verträgt und auch nur geringe klebrige Eigenschaften hat, welche oft notwendig sind. Reines Bienenwachs ist viel als Imprägnierungsmasse verwendet worden, da es gut luftbeständig ist. Aber die Wärmesicherheit genügt in vielen Fällen nicht.

Schellack und Kondensationsharze geben gute Imprägnierungsmittel ab. Selbstredend muß die Tränkungsmasse neutral sein und frei von Säure. Man hat ferner zu verlangen, daß sie einheitlich zusammengesetzt ist und Zähigkeit aufweist.

Die Art des Tränkungsmittels ist maßgeblich für das dielektrische und mechanische Verhalten des entstehenden Isolierstoffs.

Um elektrische Isolierpapiere von größerer Dicke herzustellen, wendet man für gewöhnlich als Ausgangsprodukt keine starken Papiersorten an, sondern nimmt dünne Papiere, die man mit Isoliermasse streicht oder tränkt und dann schichtet. Die Methode wird späser noch eingehender behandelt.

Man kann aber die Durchschlagsfestigkeit der Papierdielektrika nicht entsprechend der Anzahl und Stärke ihrer Lagen addieren, sondern es ergibt sich bei der Prüfung eine geringere Zahl. Hat ein imprägniertes Papier z. B. bei 0,1 mm Stärke und sonstigen feststehenden Bedingungen 6000 V Durchschlagsfestigkeit, so besitzen 5 Lagen hiervon nur annähernd 20000 V. Das Zusammenschweißen der Papierlagen hängt außer vom Tränkungsmittel noch ab von der Art des benutzten Preß- oder Walzdrucks und der hierbei angewendeten Temperatur. In der Papierfaser darf das Imprägnierungsmittel nicht zersetzlich sein, auch hat es sich nicht durch Eintrocknen zu verändern. Die Isolation würde infolge der entstehenden Zwischenräume hinfällig.

Feinpapiere, welche nach den hier gemachten Angaben durch geeignete Verarbeitung mit wasserabstoßenden hochwertigen Isolierstoffen

Digitized by Google

elektrisch nichtleitend und unhygroskopisch gemacht sind, finden in der elektrischen Feinmechanik weiteste Verwendung, z. B. in der Telegraphie und Telephonie, beim Bau der Meßinstrumente und sonstiger Apparate, ebenso im Kondensatorenbau und bei der Kabelherstellung. Gegenüber den aus Geweben gefertigten Isolierstoffen haben die Papierprodukte den Vorzug einer höheren Durchschlagsfestigkeit.

56. Papier mit Glimmer als Isoliermittel.

Man vereinigt auch die Eigenschaften von Papier und Glimmer, indem man auf imprägniertem Papier dünne Glimmerschichten aufbringt und zwar so, daß eine gute Überlappung stattfindet. Mit Hilfe eines isolierenden Klebstoffs, welcher meistens derselbe ist, wie ihn die Papierunterlage enthält, werden die Glimmerteilchen unter sich und mit dem Papier vereinigt, indem man Druck und Erwärmung mit heranzieht. Man kann auch die Glimmerschicht durch imprägniertes Papier abdecken, so daß sie also beiderseitig in Papierlagen eingebettet ist[1]).

57. Die Herstellung von Lackkartons.

Eine umfangreiche Papier verarbeitende Industrie der Elektrotechnik bildet die Herstellung von Lackkartons für Schutzkästen und ähnliche Zwecke. Die elektrische Isolation und Durchschlagsfestigkeit braucht hier nicht besonders hoch zu sein. Man verwendet eine Pappe, die sich in erster Linie durch lange Fasern auszeichnet, also mechanisch gut biegsam ist, ohne zu brechen. Derartige Pappen werden meistens unter beträchtlichem Zusatz von Altmaterial angefertigt, damit sie billig sind. Man hat sie deshalb im allgemeinen erst zu entfärben. Auf gute Kalandrierung ist Wert zu legen, damit sie ganz glatt ausfallen und Härte bekommen.

Da für die zu fabrizierenden Kästen die Pappe ausgeschnitten werden muß, so wird dies maschinell durch Stanzen oder mit Schneidemaschinen vorgenommen. Die Einzelteile klebt man dann zusammen. Dies geschieht in Eisenformen, indem man für die frischgeleimten Kartons je nach Umständen 10 Minuten bis zu mehreren Stunden die Pappen unter mäßigem Druck stehen läßt. Als Klebstoff dient eine wasserfeste Masse, z. B. Kaseinkalk oder Blutalbumin. Man kommt oft bei weniger guten Erzeugnissen auch mit einer mechanischen Verbindung der Pappenteile durch eiserne Klammern oder Streifen aus. Die fertigen Pappkästen werden nunmehr imprägniert, und zwar geschieht dies, indem man sie mit Leinöl behandelt.

Um die Pappkästen möglichst gut mit Leinöl zu durchtränken, verdünnt man die Imprägnierungsflüssigkeit mit Benzin, das natürlich später abgedunstet werden muß. Die mit Leinöl behandelten Pappen

[1]) Vgl. A. Schröder, dieses Buch S. 101.

Digitized by Google

läßt man erst eine Zeitlang, z. B. 24 Stunden, liegen, damit die Imprägnierungsmasse gut einsickert, und bringt dann die Kästen in den Trockenapparat, wo sie Temperaturen bis zu 150° ausgesetzt werden. Hier bildet sich aus der Pappe eine harte, widerstandsfähige Masse, ziemlich beständig gegen feuchte Luft. Die gehärteten Pappkästen werden dann geputzt und gegebenenfalls noch mit Spachtelkitt nachgearbeitet, welcher z. B. aus einem Gemisch von Terpentinlack mit feingepulvertem Schiefer oder dergleichen besteht. Dann lackiert man die Kästen, was mitunter mehrere Male zu geschehen hat, durch Spritzen, Tauchen oder Streichen, indem man aber zuerst noch einen Mattgrundlack unterlegt. Bei der Trocknung des Lacks im Ofen darf die Temperatur natürlich nicht höher sein wie diejenige, bei welcher die Härtung des Leinöls vorgenommen wurde, da sonst Quellungen und Blasenbildung auftreten.

Diese Schutzkästen aus Pappkarton sind Gegenstände, welche vor dem Krieg sehr billig herzustellen waren. Heute bei den sehr hohen Preisen für Öle und Lacke, auch für Pappen, sowie infolge der gesteigerten Arbeitslöhne kann man nicht mehr von einer Preiswürdigkeit dieser Fabrikate sprechen.

58. Das Leinöl.

Das Leinöl wird durch Pressen, Walzen oder Extrahieren aus dem Samen des Flachses hergestellt, welcher seiner allergrößten Menge nach aus dem Auslande bei uns eingeführt wird.

Leinöl ist ein gelbes, sehr kältebeständiges fettes Öl, welches ein spezifisches Gewicht von rund 0,93 besitzt und bei 130° unter Zersetzung zu sieden anfängt. Erhitzt man Leinöl längere Zeit um 100° höher auf ungefähr 230° bis 250°, so entsteht eine verdickte Masse, Firnis genannt. Bei 350° beginnt Leinöl zu brennen. Mit Benzin, Benzol, Terpentinöl, Schwefelkohlenstoff, Ölen und Fetten ist Leinöl in jedem Verhältnis mischbar, mit Alkohol nur teilweise.

Die chemische Zusammensetzung ist in allen ihren Einzelheiten noch nicht sicher klargelegt. Die Verwendung von Leinöl für die vorliegenden Zwecke beruht darin, daß es an der Luft in dünner Schicht zu einer festen elektrisch isolierenden Masse erhärtet. Beim Firnis verläuft dieser Eintrocknungsprozeß schneller.

59. Isolierrohr für Installationszwecke.

Bedeutende Papiermengen werden für die Anfertigung der sogenannten Isolierrohre erforderlich, welche in großen Mengen bei der Installation von elektrischen Leitungen in Starkstromanlagen nötig sind. Es ist in vielen Fällen Vorschrift des V.D.E., daß die Leitungsdrähte in derartigen Isolierrohren verlegt sein müssen. An die elektrische Isolation

Digitized by Google

werden hier keine besonders hohen Ansprüche gestellt, da die stromführenden Drähte bereits isoliert sind. Es handelt sich hauptsächlich darum, diese Drahtleitungen noch besonders gut gegen Feuchtigkeit und mechanische Beschädigungen zu schützen.

Eingeführt wurden die Isolierrohre 1891 in Deutschland durch Sigmund Bergmann, welcher sie von Amerika mitbrachte. Aus dieser Fabrikation ist die heutige Bergmann-Elektrizitäts-Werke Akt.-Ges. hervorgegangen. Anfänglich wurden die Papierrohre ohne metallischen Schutzmantel verlegt, z. B. ist seinerzeit das Gebäude des Reichsgerichts in Leipzig mit 40 000 m derartigem ungeschützten Bergmannrohr installiert. Erst später umpreßte man die Papierrohre, um eine größere mechanische Festigkeit zu erzielen, mit Messingblech oder einem verbleiten Eisen- bzw. Stahlpanzermantel, welcher mit beiderseitigem Gewinde versehen ist.

Für 1000 000 m Rohr verschiedener Durchmesser werden ca. 50 000 kg Papier benötigt, während für den gefalzten Metallschutz ca. 110 000 kg und für den Panzermantel aus Siemens-Martin-Stahl 800 000 kg Material erforderlich sind.

Die Formstücke, Dosen und Befestigungsmaterialien erfordern an Papier und Metallen noch ca. 10% der oben genannten Gewichte.

Die in Deutschland hergestellten Mengen machten jährlich vor dem Kriege ca. 100 000 000 m aus.

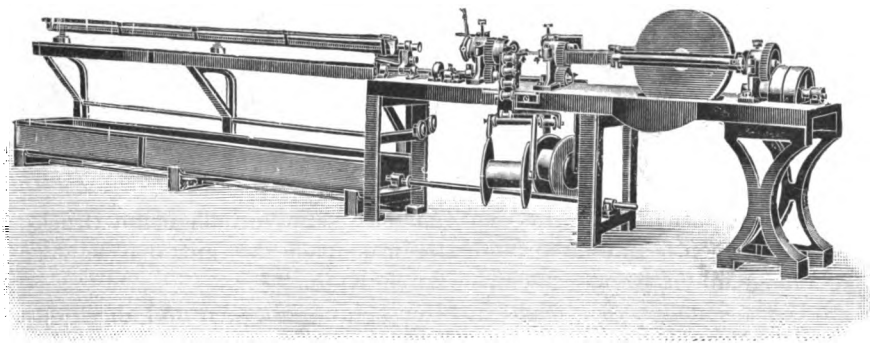


Abb. 21. Rohrwickelmaschine.

60. Herstellung des Isolierrohrs.

Auf der sogen. Rohrwickelmaschine[1]) Abb. 21, wird ein starkwandiges Papier gewöhnlicher Qualität um einen Dorn gelegt. Die Breite dieses Papierstreifens, welcher von einer Rolle abgewickelt wird, richtet sich naturgemäß nach dem Durchmesser des entstehenden Rohres. Um das durch den Dorn zu einem Rohr von kreisförmigem Querschnitt

[1]) Hersteller sind Gebr. N. u. M. Klinkenberg, Eupen.

Digitized by Google

umgewandelte dicke Papier werden zu gleicher Zeit zwei Streifen meistens dünneres Papier herumgewickelt, welche vor dem Auflegen und Andrücken an die Unterlage durch eine Klebmasse geführt sind. Als Leim kann man Kartoffelmehl nehmen, das mit etwas Alkali (Soda) versetzt ist, damit das Papprohr gut rutscht. Dieses aus drei Papierstreifen bestehende Rohr wird automatisch abgeschnitten, wenn die Länge von ungefähr 3 m erreicht ist. Man trocknet dann die Pappenrohre gut, bündelt sie und bringt sie in Eisenkäfige, welche in hohe Zylinder getaucht werden, die mit einer Lösung von geschmolzenem Pech in Teeröl gefüllt sind. Die trockenen, porösen Papierrohre sättigen sich jetzt innerhalb 5 bis 10 Minuten mit Pech. Verunreinigende Bestandteile des Pechs sinken in den Tauchzylindern zu Boden, so daß diese von Zeit zu Zeit gereinigt werden müssen. Das Herausdrücken

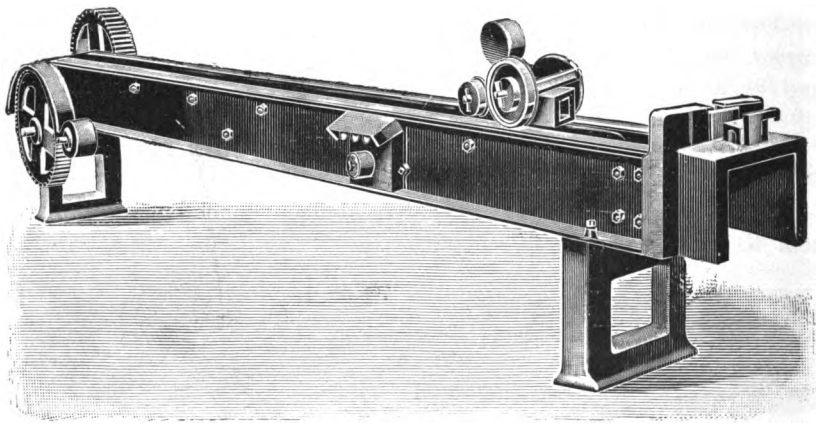


Abb. 22. Ziehbank.

des geschmolzenen Pechs aus den Zylindern kann vorteilhaft mit Druckluft geschehen. Einführen und Herausnehmen der mit den Papierrohren gefüllten Käfige geschieht durch Kran.

Die aus den heißen Pechschmelzen herausgezogenen und abgekühlten, mit Pech imprägnierten Papprohre sind nicht überall gleichförmig, so daß man sie nun noch durch ein Kaliber zieht, wobei flüssiges Pech auf die Rohre fließt. Das überschüssige Pech wird durch das Kaliber abgestrichen. Jetzt sind die schwarzen Rohre glatt und rund, so daß ein Überziehen derselben mit einem dünnen Metallblech gut vor sich geht.

Dies geschieht auf den Ziehbänken[1]), Abb. 22. Dort werden Eisenbleche, z. B. solche von 0,17 mm Stärke, welche auf beiden Seiten verbleit sind, durch ein Kaliber hindurchgezogen und umschließen dabei das mit Hartpech getränkte schwarz glänzende Papprohr. Durch

[1]) Hersteller sind Gebr. N. u. M. Klinkenberg, Eupen.

Digitized by Google

rotierende Scheiben wird das verbleite Eisenblech zusammengefalzt, nachdem die Umlagerung um das Papprohr stattgefunden hat.

Beide Enden des gepanzerten Rohres werden automatisch abgesägt, und auf einer anderen Maschine werden die Rohre gerändert, so daß sich Muffen aufstecken lassen.

Man kann natürlich die Fabrikation der Isolierrohre nach verschiedenen Richtungen hin anders vornehmen, wie es hier beschrieben ist, z. B. werden die Stärken der Papprohre und der Metallmäntel verschieden gewählt. Statt Eisenbleche kann auch Messing oder galvanisiertes Zink genommen werden usw.

Die meist 3 m langen Rohre werden mit Draht und Strohseilen zusammengebunden, die Enden mit Holzwolle und Papier verpackt, und die Kollis in dieser Weise verschickt.

Über die Beschaffenheit der Isolierrohre, wie deren Querschnitte, Stärke des Metallmantels usw., hat der V.D.E. besondere Vorschriften erlassen.

61. Der Rohrdraht.

Den in Isolierrohr verlegten Leitungen sind in bezug auf ihren Verwendungszweck die Rohrdrähte zu vergleichen. Man stellt sie folgendermaßen her.

Der Kupferdraht wird zunächst mit einer dünnen Gummi- oder auch Paraffinschicht überzogen, dann umklöppelt man ihn mit einer Lage von imprägniertem dünnen Papier und zugleich mit einer zweiten derartigen Lage Papier, was in derselben Maschine vor sich geht, indem der eine Vorgang aber erst nach dem anderen erfolgt. Die isolierenden Papiere werden in Streifen geschnitten, auf Rollen gewickelt und durch den Umspinnungsprozeß von diesen Rollen abgezogen. Derartige mit Papierband umklöppelte Leitungsdrähte können zu mehreren von einem Metallmantel umschlossen werden.

Will man z. B. 3 solcher bereits mit einer doppelten Papierlage umklöppelte paraffinierte Kupferdrähte in einem Rohr unterbringen, so werden die isolierten Drähte dann verseilt und dabei eine Einlage gemacht, um den leeren Raum auszufüllen. Die Einlage kann aus Papiergarn bestehen, oder, wenn man die Raumausfüllung noch in besserer Qualität vornehmen will, aus Baumwolle oder Jute. Diese dreifache Verseilung umwickelt man noch zweimal mit isolierendem Papierband und zieht das Seil durch heißes Kabelwachs oder Montanwachs. Auf einer Ziehbank wird dann verbleites Eisenblech oder Zinkblech herumgelegt, wie dies bei der Isolierrohrfabrikation in ähnlicher Weise gehandhabt wird. Die Blechkanten vereinigt man durch Falzung.

62. Abzweigdosen.

Die bei der Installation benötigten Abzweigdosen enthalten ebenfalls isolierende Papiereinlagen. Man wickelt Papprohre, macht sie

Digitized by Google

glatt und schneidet kurze Enden ab. Die Böden für die Pappzylinder stanzt man aus. Die Pappteile werden wieder in einer heißen Pechschmelze mit Zusatz von Teeröl getränkt. In die aus Metallblech ausgestanzte Dose werden die Pappteile hineingepreßt und eine seitliche Einführungsöffnung für den Leitungsdraht angebracht.

63. Der Preßspan.

Weite Verbreitung bei der Fabrikation elektrischer Maschinen sowie im Transformatoren- und Apparatebau, überhaupt in der Hochspannungstechnik, findet der Preßspan. Dieser wird mit und ohne Imprägnierung hergestellt. Preßspan ist eine zähe, biegsame Zellstoffmasse, bei deren Anfertigung oft ein wesentlicher Teil Hadern mit benutzt wird. Bei 100° soll er wenig an seiner mechanischen Festigkeit einbüßen. Nicht imprägnierter Preßspan darf keine offenen Schnittflächen zeigen, da er an diesen Stellen am wenigsten feuchtigkeitssicher ist. Unter Öl im Transformator machen diese unimprägnierten Schnittflächen natürlich nichts aus. Bei der Tränkung der Papiermassen mit Leinöl ist hinreichend lange bei 100 bis 110° zu kochen, und später unter Luftzutritt im Trockenschrank hat eine intensive Wärmeeinwirkung stattzufinden. Nicht getränkter Preßspan besitzt eine Durchschlagsfestigkeit von 6000—7000 V/mm, unter Umständen noch mehr, d. h. wenn er im Vakuum von Feuchtigkeit freigemacht ist. Mit Lack oder Öl imprägnierter Preßspan hält bei 1 mm Stärke eine Dauerbelastung von ungefähr 8000 bis 10000 V aus.

Ob der Preßspan der Hauptsache nach aus Holzzellstoff, Baumwolle, Jute, Hanf oder Flachs besteht, ist für den Wert seiner Durchschlagsfestigkeit unerheblich, wohl aber für sein mechanisches Verhalten. Nicht imprägnierte Zellstoffaser ist verhältnismäßig leicht zersetzlich. Baumwolle zeigt sich widerstandsfähiger; Hanf wird von heißem Öl angegriffen. Besser bewährt sich die Flachsfaser. Preßspan aus Jute und Hanf neigt mehr zur Feuchtigkeitsaufnahme wie solcher aus Baumwolle. Jute und Baumwolle vereinigt geben die besten Eigenschaften[1]).

Fabrikmäßig stellt man Preßspan von 1/10 mm Stärke an her bis zur Dicke von 30 mm. Er wird schwarz, gelb, grau sowie matt oder glänzend geliefert. Infolge der Preiswürdigkeit und der Beständigkeit in heißen Ölen, verbunden mit einer hohen Druck- und Zugfestigkeit, welche 500—700 kg/qcm beträgt, ist er ein sehr wichtiges Isoliermaterial beim Bau von Spulen und Spulenkörpern[2]). Das spezifische Gewicht der Tafeln von 1 mm Stärke beträgt ungefähr 1,3 bis 1,5.

[1]) The Electrician, 1921, Bd. 7.

[2]) B. Tedeschi, Untersuchung elektrischer Leitfähigkeit einiger Preßspan- und Pilitsorten. Arch. I, S. 497.

Digitized by Google

64. Das Papier in der Kabelindustrie.

Die imprägnierten Papiere haben im Laufe der Zeit eine ganze Anzahl anderer früher viel benutzter elektrischer Isolierstoffe stark verdrängt. So in der Industrie von Kabeln und isolierten Leitungen die Gummi- und Guttapercha-Umkleidungen. Imprägnierte Papiere werden hier in immer mehr zunehmendem Umfang verarbeitet.

Im einzelnen soll jetzt auf die Herstellung von Kabeln und isolierten Leitungen nicht eingegangen werden. Es sei nur gesagt, daß bei dem Bau langer isolierter Straßen für den elektrischen Strom, z. B. bei Telephonleitungen, anfänglich große Betriebsschwierigkeiten zu überwinden gewesen sind. Hier zeigt sich, welche bedeutsame Rolle das isolierende Mittel spielt. In langen Leitungen tritt eine erhebliche Kapazität auf, welche von der Art des umgebenden Isolierstoffs abhängt, ebenso von den Dimensionen desselben, also Länge und Querschnitt. Durch die Kapazität wird die Kurvenform des in die Leitung hineingesandten Stroms geändert und abgeschwächt, so daß eine Übertragung der elektrischen Kräfte schließlich ganz aufhört. Der Kabeltechniker hat daher die Aufgabe, die Kapazität zu kompensieren, was durch Einbauen von Induktivitäten, z. B. von Pupinspulen, geschieht. Oder man wendet die Krarupsche Methode der Umspinnung mit feinen Eisendrähten an. Eine Luftmantelhülle vermindert die Kapazität.

Papier, welches zur Umwickelung von Drähten benutzt wird, soll frei sein von chemischen Bestandteilen, welche auf die Dauer die Zellulose zersetzen können. Es hat daher, besonders bei Kabelpapieren, eine eingehende Prüfung stattzufinden, besonders auf das Vorhandensein von Chlor, freien Säuren, Schwefel und Schwefelverbindungen. Die Festigkeit des Papiers ist zu untersuchen, es darf nicht vorzeitig reißen und muß überall gleichmäßige Dicke haben, sowie frei sein von Falten und Löchern. Dabei hat es schmiegsam zu sein, damit es sich eng an die Unterlagen anlegen kann. Man verwendet deshalb gern Natronzellstoff, sogen. Kraftzellulose, welche eine längere Faser besitzt wie Sulfitzellulose. Geleimt werden die Kabelpapiere nicht, es soll sich bei ihnen große Saugfähigkeit mit hoher mechanischer Festigkeit vereinen.

Bei Bestimmung der elektrischen Festigkeit der imprägnierten Papierisolation eines Starkstrom-Kabels ist natürlich zu beachten, daß hier kein homogenes Feld vorliegt, und die Beanspruchung an der Leiteroberfläche am höchsten ist und am geringsten an dem inneren Bleimantel[1]).

Außer auf die Größe des Durchschlagswertes kommt es bei Wechselstrom noch auf die inneren Verluste im Dielektrikum an, welche der Periodenzahl und dem Quadrat der Spannung verhältnisgleich sind.

---

[1]) Pfannkuch, W., Fahrbare Gleich-Hochspannungsanlage zur Prüfung verlegter Kabelstrecken. A.E.G.-Mitt. 1923, Heft 1.

Digitized by Google

Zu der Frage, ob eine übermäßige Spannungsbelastung von Kabeln der imprägnierten Papierisolation nachteiligen Schaden bringt, hat Klein[1]) Versuche vorgenommen. Es ergab sich, daß bei Kabeln, die erheblich über ihre Betriebsspannung hinaus belastet waren, ein Rückgang der elektrischen Festigkeit um 9—13% stattfand. Als er dieselben Kabel nach fünf Wochen wieder prüfte, stellte es sich heraus, daß die Verschlechterung inzwischen verschwunden war. Das Nachlassen der elektrischen Festigkeit war also nicht dauernd. Man kann hier vielleicht annehmen, daß das Imprägniermittel unter der hohen Feldbelastung teilweise gewandert war, inzwischen aber wieder Zeit gefunden hat, sich erneut überall in den faserigen Bestandteilen festzusetzen.

An der Zerstörung der Papierisolation bzw. an der Verschlechterung des Imprägniermittels ist der Luftsauerstoff stark beteiligt. Etwas Luft ist immer in der isolierenden Schicht eines Kabels vorhanden. Clark und Shanklin[2]) fanden, daß bei rund 2000 V/mm die Luft derartig ionisiert wird, daß sie die isolierende Hülle zerstört.

Es scheint aber, sofern es sich nicht um größere Mengen Luft im Kabel handelt, sondern um geringfügige Spuren, daß die Papierschicht nicht wesentlich leidet, selbst wenn die Feldstärke noch erheblich höher ist als der eben angegebene Wert. Es gibt Kabel, die seit vielen Jahren störungsfrei in Betrieb sind und Feldstärken der Papierisolation bis 4000V/mm und mehr aufweisen[3]).

Neuerdings sind die dielektrichen Verluste in imprägnierten Papieren und die zulässige Höchsttemperatur derselben in Hochspannungskabeln von M. Hoechstädter[4]) untersucht[5]). Hoechstädter kommt zu dem Ergebnis, daß außer der Konstruktion der Kabel bei einer dauernden Einwirkung von Spannung und Temperatur die chemische Veränderung der homogenen Isolierstoffe der elektrischen Beanspruchung Grenzen setzt. Ermittlungen über die Auswahl des Imprägniermittels und dessen Verarbeitung mit einer geeigneten Papierart sind leider nicht vorgesehen. Proos stellt die Abhängigkeit des Verlustwinkels von der Spannung fest, ferner von der Zeit und von der Temperatur und kommt zum Ergebnis, daß eine bestimmte Spannung besteht, bei welcher die in der Isolation vorhandene Luft ionisiert wird.

Außer durch die Betriebsspannung ist die Kabelisolation noch gefährdet durch Wanderwellen, also durch Spannungen zwischen benach-

[1]) Klein, M., Hackethal-Nachrichten, I. Jahrg., Sept. 1921. Derselbe, Ermüdung von Hochspannungskabeln. ETZ 1923, S. 233.

[2]) Clark u. Shanklin, Proc. A.I.E.E. Februar 1919, S. 663.

[3]) Davis u. Simons, Elektr. Journal; Juli 1920, S. 292.

[4]) Hoechstädter, M., ETZ 1922, S. 205. Derselbe, Der Ionisierungspunkt von Hochspannungskabeln. ETZ 1922, S. 575.

[5]) Ebenso von C.F. Proos, Die elektrischen Verluste in Hochspann.-Kabeln. Ref. Elektrot. Anzeiger 1923, Nr. 1—8.

Digitized by Google

barten Punkten des Leiters. Die hier auftretenden die Betriebsspannung um das Mehrfache überschreitenden Potentialdifferenzen sind häufig ganz wesentlich größer wie die elektrische Festigkeit des imprägnierten Papiers. Es kommt aber in den meisten Fällen nicht zur Zerstörung des Dielektrikums, weil eine erhebliche Durchschlagsverzögerung eintritt.

65. Die Wärmebeständigkeit des Papiers und des imprägnierten Papiers.

Papier wie auch Zellstoff sind äußerst leicht durch Wärme zu zersetzen. Bei weniger wie 100° beginnt die Oxydation, die mechanische Festigkeit des Papiers fängt an, schlechter zu werden. Zwischen 105—110° erfolgt der Zerfall. Sind die Papiere mit Säurespuren durchsetzt, z. B. als Folge der Behandlung mit Tonerdesulfat, weniger mit Alkalien, so geht die Zerstörung schon bei niedriger Temperatur vor sich. Ähnlich wirken Lacke ein, bei denen sich die Eigenschaft als Sauerstoffüberträger bemerkbar macht.

Bei der Einwirkung von Wärme auf die Papierisolation der Kabel ist zu beachten, daß die imprägnierten Zellstoffasern mit Blei umkleidet sind, und der Luftsauerstoff sich nicht an der Zerstörung der Zellulose in der Weise betätigen kann, als wenn sich das Papier offen an der Luft befindet. Durch übermäßiges Erhitzen der Kabel wird die mechanische Festigkeit des imprägnierten Papiers herabgedrückt, es bildet sich schließlich eine braune bis schwarze, krümelige, leicht pulverbare Masse.

Früher war schon erkannt, daß die Zeiten der Erhitzung eine große Rolle bei der Veränderung des Zellstoffs spielen.[1]) Man hatte z. B. Bleikabel im Thermostaten in geschmolzenem Paraffin bei 93° und bei 100° gelagert. Dauerte im ersten Fall die Erwärmung eine Woche, so läßt sich noch keine wesentliche Verschlechterung des imprägnierten Papiers feststellen, wohl aber nach vier Wochen. Bei 100° und einer Lagerung des Kabels im Thermostaten während einer Woche war die Verschlechterung so groß wie vorher bei 93° und vier Wochen. Setzte man das Kabel bei 100° einer Dauererwärmung von vier Wochen aus, so wurde das Papier vollständig brüchig. Als zulässig ist damals auf Grund dieser Versuche eine Temperatur von 85° angesehen worden.

Papiere, welche im Ofen getrocknet sind, und solche, die bei 125° mit Petroleumrückständen imprägniert wurden, zeigen annähernd dieselbe Festigkeit. Bei gewöhnlicher Temperatur im Vakuum getrocknete und mit Transformatorenöl gesättigte Papiere und Papiere, welche bei 80° in Petroleumrückständen gelegen hatten, weisen erhebliche Unter-

[1]) Fisher, H. W. u. Atkinson, R. W., A.I.E.E. 1921, Bd. 40, S. 183. Ref. ETZ 1921, S. 1335.

Digitized by Google

schiede in ihrem mechanischen Verhalten auf. Das Ölpapier ist 10% weniger fest wie Vakuumpapier, letzteres um ungefähr 35% minderwertiger wie petrolimprägniertes Papier.

Das Nachlassen der mechanischen Festigkeit des Papiers unter Öl erklärt L. Schüler[1]) durch eine chemische Einwirkung des Öls auf die Faser. Möglich ist, daß Oxydation eintritt. Aber andererseits können sich hier rein physikalische Vorgänge abspielen, wie bekannt ist, daß Öle sowie das in keiner Weise oxydierend wirkende Paraffinöl die Struktur poröser Kunststeine zerstören.

Bewahrt man Papier in Luft von 30% Feuchtigkeit auf, und legt man dieselbe Papiersorte in kaltes Transformatorenöl, so lassen sich keine Unterschiede in ihren mechanischen Verhalten feststellen. Wird Papier aber bei 80° mit Petroleummasse imprägniert, erweist es sich um 24% fester. Ein lange Zeit andauerndes Tauchen in Öl verschlechtert die Festigkeit von Papier nur wenig. Erwärmt man bei gewöhnlicher Temperatur unter Luftleere entfeuchtetes Papier auf 175°, so ist die Zerreißfestigkeit nach 220 Stunden fast Null. Papiere, die bei 20% und 30% Luftfeuchtigkeit gelagert hatten, zeigten nach 290stündiger Erwärmung auf 125° nur noch 55% ihrer früheren Zerreißfestigkeit und nach 190stündiger Erwärmung auf 150° nur noch 16% davon.

Vergleicht man die prozentuale Verschlechterung des Papieres infolge Erwärmung mit der Temperatur und den Erwärmungszeiten, so ergibt sich, daß die Abnahme der Zerreißfestigkeit in Höhe von 20%, 30%, 50%, 60% und 80% ihrem Werte nach in gleichartiger Weise erfolgt, indem diese Erscheinungen nahezu parallel verlaufen. So kann man eine Verschlechterung des Papieres um 80% bei 100° nach 900 Stunden feststellen, sowie bei 150° bereits nach 5 Stunden. Bei 150° Erwärmung erfolgt eine 60%ige Verschlechterung nach 20 Stunden, derselbe Grad der Feuchtigkeitsabnahme bei 97° Erwärmung erst nach Einwirkung von 10000 Stunden (1 Jahr). Ein 20%iger Nachlaß der mechanischen Eigenschaften tritt bei Erwärmung auf 120° nach 5000 Stunden ein.

Man erkennt, daß das Papier selbst bei niedrigen Temperaturen bei entsprechend langer Erwärmungszeit stets fortschreitend an mechanischer Güte nachläßt. Fisher und Atkinson haben aus ihren Untersuchungen folgende zulässige Temperaturen vorgeschlagen:

Eine beständig in Kabel auftretende Temperatur soll 78° nicht übersteigen. Für 5 Stunden am Tage kann die Temperatur 85° betragen, während $2^1/_4$ Stunden am Tage 90° und für eine halbe Stunde am Tage 100°. Anzuraten ist, lieber einige Grad mit der Temperatur unter der als zulässig vorgeschlagenen zu bleiben, als darüber hinauszugehen, da die Betriebssicherheit des Kabels stark beeinträchtigt wird.

[1]) Schüler, L., Ref. ETZ 1922, S. 396.

Digitized by Google

Die Versuchsansteller haben Öle und gewöhnliche im Handel käufliche Petrolrückstände zum Imprägnieren des Papiers benutzt. Es ist sehr die Frage, ob Handels-Petrolrückstände hier wirklich die geeigneten Tränkmittel sind, denn diese und ähnliche Stoffe bestehen aus vielerlei leichtflüssigen, z. T. sogar flüchtigen Bestandteilen. Auch ist das Imprägniermittel nicht auf Säurefreiheit untersucht worden. Papier, das mechanische Gemisch von organischen leicht veränderlichen Fasern, dient hier nur als Träger der Isolation. Die Imprägniermasse ist das wirkliche Dielektrikum.

Werden durch Erwärmung die niedrig destillierenden Bestandteile des Imprägniermittels ausgeschieden, so entstehen schwache Stellen und Lufträume. Das Papier zerfällt infolge Oxydation. Es können Gase auftreten, wie dies auch mehrfach bei Bleimantelkabeln berichtet wird, welche durch den Druck des Gases sogar aufgetrieben wurden.

Wird ein isolierendes Imprägniermittel verarbeitet, das bei den auftretenden Wärmegraden unverändert bleibt, und vereinigt man das Papier mit dem Tränkungsstoff derart, daß elektrolytische und elektroosmotische Einflüsse bei den in Frage kommenden Spannungen ausgeschaltet werden, so ist kein Grund einzusehen, weshalb solche Isolation nur beschränkte Dauer besitzen soll.

Eine unzweckmäßige Kabelimprägnierung kann sogar Störungen[1]) der benachbarten Kabelmuffen verursachen, indem die leichtflüssigen Bestandteile des Tränkungsmittels in die Muffen einwandern und Kurzschluß herbeiführen. Die Außgußmasse wird von den niedrig schmelzenden Imprägnierungsmitteln aufgeweicht, die Folge davon ist dann eine Verminderung der elektrischen Festigkeit.

Einen Beitrag zu den Untersuchungen über die zulässigen Betriebstemperaturen in Kabeln mit imprägnierter Papierisolation hat Roper[2]) geliefert. Über die Art des Imprägniermittels ist hier überhaupt nichts gesagt. Die Versuche wurden ausgeführt an den konzentrischen Zweileiter-Niederspannungs-Gleichstrom-Speisekabeln in Chicago. Die Kabeltemperaturen sind entweder durch direkte Messungen mit Thermometer festgestellt oder durch Änderungen des Leiterwiderstandes.

Die Erwärmung dieser Kabel während der Wintermonate betrug jede Nacht mehrere Stunden lang mehr wie 100°; vom Montag bis zum Freitag stieg die Temperatur gradlinig an, vorübergehend kann die Erwärmung des inneren Leiters 200° betragen haben. Bei einem Kabel wurde eine offene Stelle im Bleimantel entdeckt. Hier war das Papier schwarz und brüchig geworden und zerfiel bei Berührung.

---

[1]) Vincenz, G., Eigenartige Störungserscheinungen an Hochspannungs-Kabelendverschlüssen. Mitt. d. V. der E.W. 1922, S. 358.

[2]) Roper, D. W., A.I.E.E. 1921, S. 201, Ref. ETZ 1922, S. 1211.

Digitized by Google

Einige Meter von dieser Stelle, welche aber durch den Bleimantel von der Luft abgeschlossen war, wurde das Kabel geöffnet. Das Papier zeigte hier nur eine bräunliche Färbung, besaß aber noch eine gute Durchtränkung der Imprägniermasse. Ein Teil der mechanischen Festigkeit war aber verloren gegangen.

Bei einer Erwärmung des Kupferleiters bis auf 105° wurden bei unbeschädigtem Bleimantel keine Verschlechterungen der Papierisolation ermittelt. Die nur kurze Zeit eintretenden höheren Temperaturen haben der Isolierung keinen wesentlichen Schaden getan.

Roper kommt zu dem Ergebnis, daß bei dauernder Erwärmung auf ungefähr 110° eine Zerstörung der Isolation ausgeschlossen ist. Bei andauernder Einwirkung einer Temperatur von 180° tritt mit Sicherkeit die Vernichtung des Dielektrikums ein. Die Zwischenstufen wurden nicht näher untersucht, was aber recht wissenswert gewesen wäre.

Von amerikanischer Seite liegen noch eine ganze Anzahl Arbeiten über die Wärmebeständigkeit von imprägniertem Papier vor[1]). Es wird z. B. erwogen, ob die bisher als zulässig angenommene Dauertemperatur von 105° dem imprägnierten Papier wirklich unschädlich ist[2]).

G. Dettmar[3]) kommt zum Ergebnis, daß papierumsponnene Drähte, die ruhig liegen, bis 115° C aushalten, in Bewegung befindliche aber nur 105—110° C.

L. Schüler glaubt, daß die Papierumspinnung bei beweglichen Wickelungen in Luft 95° C höchstzulässige Dauerbelastung verträgt, in Öl kann bei ruhender Wickelung 105° C als zulässig angesehen werden.

Anführen will ich noch die Vorschriften der Kabelkommission der Vereinigung der holländischen Elektrizitätswerke[4]), welche besagen, daß in Niederspannungskabeln Stromstärken zulässig sind, solange dadurch keine Temperaturen über 50° C hervorgerufen werden, und in Hochspannungskabeln keine solchen über 45° C.

Die Beziehungen zwischen erwärmten Papieren und deren Durchschlagsfestigkeit hat W. S. Flight zum Gegenstand vergleichender Untersuchungen gemacht[5]). Von 30° C bis zu 100° C sinkt die dielek-

[1]) A.I.E.E. 1921, S. 96., A.I.E.E. 1921, S. 113., A.I.E.E. 1921, S. 145.

[2]) Eine bisher nicht veröffentlichte Arbeit über den Einfluß trockener höherer Temperaturen auf die Festigkeitseigenschaften von Papieren stammt von F. W. Flasskämper, Juli 1910. (Aus d. Mech. Technol. Inst. der Dresdner Techn. Hochschule.)

[3]) Über die Notwendigkeit der Aufstellung von Normen für die Bestimmung und Angabe von Leistung, Erwärmung und Wirkungsgrad elektrischer Maschinen. ETZ 1900, S. 727.

[4]) van Staveren, J. C., Einige Bemerkungen anläßlich der von holländischer Seite vorgeschlagenen Kabelnormung und Kabelprüfung. Mitt. d. V. d. E. W. 1922, S. 436.

[5]) Flight, W. S., Wirkungen der Wärme auf die dielektrischen Eigenschaften von Isoliermaterialien. El. Review 1922, Heft 91, S. 227.

Digitized by Google

trische Festigkeit von 1,59 mm starken lackimprägnierten Papieren in Luft um 30 %, in Öl um 50 %. Es werden dann Parallelversuche vorgenommen hinsichtlich des Verhaltens von lackimprägniertem Leinen, Mikarta, Glimmerprodukten, Fiber, imprägniertem Holz und Preßstoffen, welche zeigen, daß alle diese Nichtleiter bei 100° bedenklich an elektrischer Festigkeit abnehmen, am wenigsten noch Glimmerprodukte, und zwar 5 %.

Die vorgenommenen zahlreichen vielseitigen Untersuchungen der Wärmefestigkeit von Papier weisen durchgängig den schon vorher gekennzeichneten Mangel auf, das die Masse, mit der das Papier getränkt ist, kaum ausgewertet wurde. Ehe nicht das Verhalten der Imprägniermittel in chemischer und physikalischer Hinsicht und in seiner Wirkung auf die Faser eingehender erforscht wird, werden wir kaum mit Fortschritten auf dem Gebiete elektrisch höher zu belastender Maschinen und Kabel zu rechnen haben.

66. Feste Hochspannungsisolierkörper aus Papierlagen.

Eine bedeutende Industrie elektrischer Isoliermassen hat sich aufgebaut auf die Schichtung von imprägnierten dünnen Papieren zu dann nicht mehr biegsamen, sondern festen Isolierstoffen, welche bearbeitbar sind ähnlich wie Hartholz oder weiches Metall.

Bei der Herstellung verfährt man in der Weise, daß die bestrichenen oder getränkten Papiere übereinandergelegt und bei Anwendung von Hitze einem starken Druck[1]) ausgesetzt werden.

Die Bestreichung, bzw. die Tränkung der Papiere mit geeigneten Imprägniermitteln erfolgt für gewöhnlich maschinell. Abb. 23 zeigt eine Rollen-Lackiermaschine[2]), welche Breiten bis zu 2 m und mehr ein- und doppelseitig mit dem Imprägniermittel versieht. Das Verdunsten des Lösungsmittels kann mit Dampf wie mit Gas erfolgen, es ist deshalb eine lange Trockenbahn vorgesehen.

Es ist durch geeignete Anlagen möglich, die Lösungsmittel wieder zu gewinnen.

Für die Anfertigung von Platten aus Papier legt man die lackierten dünnen Blätter übereinander und kühlt zweckmäßig die Preßplatten, nachdem der heiße Druck genügend lange eingewirkt hat. Das Schneiden der bestrichenen Papiere geschieht natürlich auch mit Maschinen. Die Ränder der Isolierkörper sind zunächst rauh und müssen geglättet werden.

Derartige Platten finden vielseitige Anwendung in der Hochspannungstechnik. Für Starkstromanlagen eignet sich dieses Material deshalb nicht, weil es nicht feuersicher ist. Es würde außerdem in den meisten Fällen zu teuer sein.

---

[1]) Retzow, Dr., Der Einfluß des Herstellungsdrucks auf einige Eigenschaften der Hartpapiere. Kunststoffe 1922, S. 49.

[2]) Hersteller ist die Walter Kellner A.-G., Barmen-Wichl.

Digitized by Google

In großem Maße wird imprägniertes Papier durch Wickeln zu Röhren von jedem Durchmesser verarbeitet. Es wird ein zylindrischer metallischer Bolzen genommen, und um diesen die mit Lack bestrichene oder getränkte Papierbahn herumgewickelt. Der etwas konische Bolzen läßt sich leicht aus dem Rohr herausschlagen.

Handelt es sich um meterlange Rohre, so ist die gleichmäßige Anfertigung solcher Fabrikate äußerst schwierig. Man mußte erst viel Lehrgeld zahlen, ehe man gelernt hat, die Anfertigung dieser Körper so zu gestalten, daß ein unbedingt betriebssicheres Hochspannungsmaterial erzielt wird.

Solche langen Rohre kommen z. B. zur Anwendung bei der von

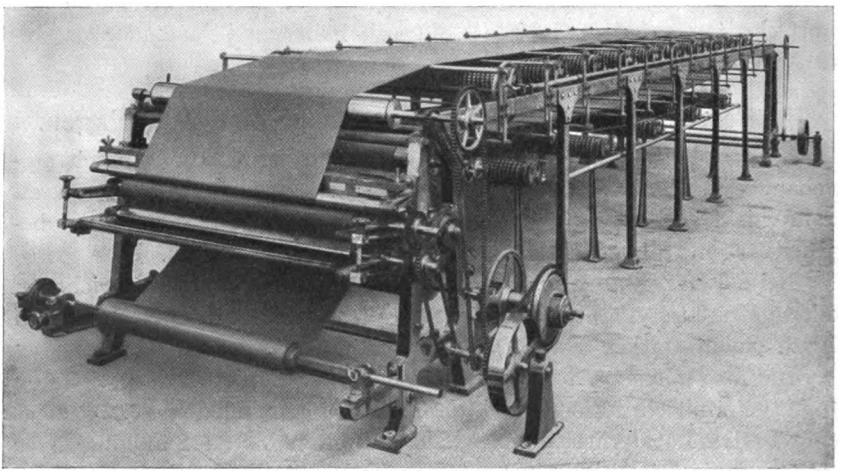


Abb. 23. Rollenlackiermaschine.

I. Sessinghaus[1]) herrührenden Meßstange für Hängeisolatoren, welche in Abb. 24 abgebildet ist. Außer einer hohen elektrischen Isolation sind hier leichtes Gewicht und mechanische Festigkeit des Nichtleiters (Repelit) erforderlich. Hersteller dieser Meßstange, welche erlaubt, fehlerhafte Hängeisolatoren während des Betriebs herauszufinden, sind die Siemens-Schuckert-Werke.

Das Wickeln geschieht auf breiten Maschinen, in denen die Papierbahn straff gehalten wird. Außerdem findet während des Aufwickelns ein Andrücken der Papierlagen durch heiße Walzen statt. Die aufgewickelten Papierschichten haben einen einheitlichen Körper zu bilden. Wasserdampf aus der Luft, sowie Luft selbst, dürfen nicht mit in die Masse hineinkommen, weil sonst durch die verschiedene spezifische Kapazität elektrisch unsichere Stellen entstehen und durch Ozon- und Salpeter-

[1]) Siemens-Zeitschrift 1921, 3. Heft, S. 73.

Digitized by Google

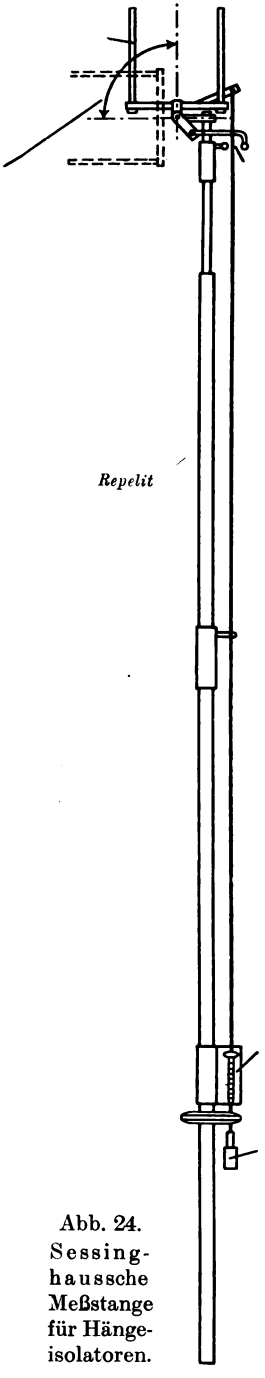


Abb. 24. Sessinghaussche Meßstange für Hängeisolatoren.

säurebildung eine Zerstörung sowohl der Zellstoffmasse wie auch des Bindemittels bewirkt wird.

In Abb. 25 ist eine Röhrenwickelmaschine, System Kellner, abgebildet, bei welcher die Heizung mit Gas geschieht. Man kann aber hier auch Dampf und Elektrizität zum Heizen verwenden.

An Stelle von runden Rohren lassen sich natürlich auch ovale oder achteckige wickeln. Besser ist aber, diese zunächst als runde herzustellen. Die runden Rohre werden hierbei weich gehalten, dann in Eisenformen eingelegt, deren Gestalt die Isolierkörper annehmen sollen. Durch Keile wird das Papier an die Wandflächen der Form angedrückt.

Die Verwendung von gewickelten Isoliermaterialien aus Papier ist eine sehr mannigfaltige; man stellt daraus große und kleine Formstücke wie Scheiben, Ringe, Walzen, Schrauben, Röhren, Mäntel, Unterlagen jeder Art und dgl. her. Infolge der guten Bearbeitbarkeit lassen

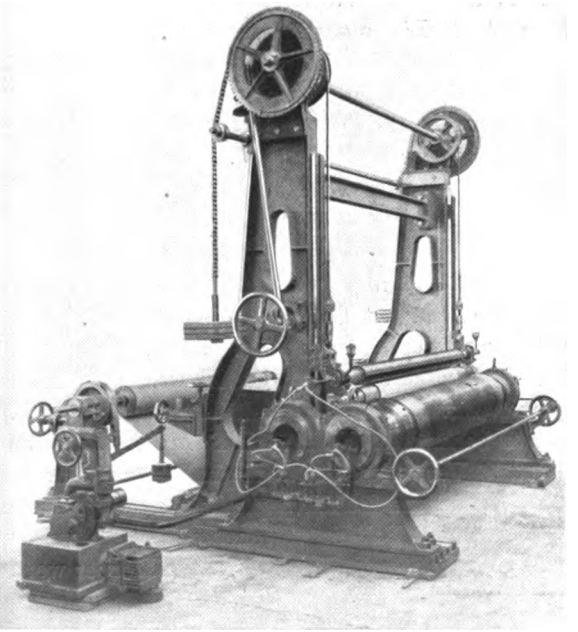


Abb. 25. Röhrenwickelmaschine.

Digitized by Google

sich gewickelte Zelluloserohre und gepreßte Platten bohren sowie sägen, außerdem, was sehr wichtig ist, gut auf der Drehbank behandeln, so daß man die für das elektrische Feld geeignete Form herstellen kann. Für die Anfertigung von Stützisolatoren mit und ohne Metalleinlagen, Durchführungen und Umkleidungen ist imprägniertes Papier infolge seiner mechanischen Bruchsicherheit ein brauchbares Material.

67. Der Schellack.

Von Imprägniermitteln für hochwertige Platten und Hochspannungsrohre haben sich vor allem Schellack und Bakelit als brauchbar erwiesen.

Schellack oder Gummilack wird aus indischen Gummilackbäumen gewonnen und fließt aus den Trieben dieser Bäume aus, den die Lacklaus einsticht. Er erhärtet als ein gelber bis dunkelroter Saft. Den mit Holzteilen verunreinigten Stocklack oder Körnerlack trennt man unter nebenhergehender Gewinnung einer roten Farbe von den Nebenbestandteilen durch Ausschmelzen, indem der leichtflüssige Anteil das gewünschte Schellackprodukt ergibt. Eine weitere Ausscheidung eines im Schellack vorhandenen Wachses, des Schellackfetts, nimmt man durch kochende Soda vor. Reiner Schellack muß sich restlos ohne Trübung in Alkohol lösen. In flüchtigen Ölen, Schwefelkohlenstoff und Äthyläther gelingt die Auflösung nicht vollständig. Für die Verarbeitung zu Zellstoff-Isolierkörpern wird fast ausschließlich Alkohol als Lösungsmittel benutzt.

Die Isolierfähigkeit und Durchschlagsfestigkeit mit Schellack gewickelter Papiermassen ist eine sehr gute, man gelangt bis zu 20000 V/mm. Die Wärmebeständigkeit ist jedoch eine niedrige, da Schellack bereits erheblich unter 100° schmilzt. Die Dielektrizitätskonstante gewickelter Schellackrohre beträgt 4,2 bis 4,4.

68. Feste Bakelit-Papierisolierstoffe.

Um die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe aus Papier zu erhöhen, wendet man statt Schellack Bakelit[1]) an. Über die Technologie des Bakelits ist bereits auf Seite 191 u.ff. eingehend berichtet.

Wiederholt sei, daß sich Bakelit A in Alkohol löst. Die Papiere werden entweder mit Bakelit A oder einer alkoholischen Lösung desselben behandelt. Nach dem Bestreichen verdunstet der Alkohol durch längeres Verweilen der Papierbahnen in einem Raum von 50 bis 60°. Das bestrichene Bakelitpapier sieht hellglänzend aus.

Diese mit Bakelit versehenen Papiere werden nach dem Trocknen heiß gewickelt, und die gewickelten Körper werden dann in der Wärme

[1]) Senst, W., Isolationen aus Kunstharz und Faserstoffen. El. Be. 1923, Heft 16, S. 193.

Digitized by Google

bei ungefähr 130 bis 140° gehärtet, so daß das Bakelit in die Endmodifikation C übergeht. Die gasförmigen Bestandteile sind restlos zu entfernen.

Da bei diesem Verfahren härtbare Harze angewendet werden, so findet bei dem Wickeln oder Schichten unter dem Druck der Presse eine Härtung des synthetischen Harzes statt, welches Verfahren der Bakelite-Gesellschaft geschützt ist.

Bakelitrohre sind in heißem Öl vollkommen beständig, was Schellackrohre nicht sind. Sie vertragen Wärmegrade bis zu 250°, so daß sie im Transfromatorenbau viel benutzt werden. Man stellt sie in jeder gewünschten Wandstärke her, in Längen bis zu 1,5 m und darüber.

Auch ist es möglich, gewickelte Bakelit-Zellstoffmassen mit Glimmereinlagen zu versehen.

69. Mechanische und elektrische Eigenschaften der geschichteten festen Papierdielektrika.

Es ist ohne weiteres verständlich, daß ein Unterschied im Verhalten der zusammengepreßten Papierkörper bestehen muß, je nachdem man sie in ihrer Längs- oder Querrichtung beansprucht. Holzschrauben, welche parallel zur Oberfläche der Platten eingedreht werden, können leicht eine Spaltung hervorrufen. Auch für die Feuchtigkeit ist die Schichtung ein wirksamer Angriffspunkt. Papierdielektrika nehmen in feuchten Räumen bis zu 1% an Gewicht auf, je nach der Saugfähigkeit der Faser und ihrer Imprägnierung. Infolgedessen hat man besonders das Äußere der Querlagen gut mit einem Schutzlack zu versehen. Unhomogenität und Feuchtigkeit sind der Grund, weshalb die dielektrischen Verluste im geschichteten, imprägnierten Papier erhebliche Werte annehmen können[1]). Die Isolierfähigkeit und Durchschlagsfestigkeit sind parallel zu den Lagen wesentlich ungünstiger wie senkrecht dazu.

In senkrechter Richtung besitzen diese Papierisolierstoffe, welche man auch kurzweg als Hartpapier bezeichnet, eine bedeutende elektrische Festigkeit, die bis zu 20000 V/mm und darüber betragen kann.

Hartpapier tritt mit Porzellan[2]) in Wettbewerb z. B. als Stütz-

---

[1]) Wagner, K. W., Dielektrische Eigenschaften von verschiedenen Isolierstoffen. Arch. f. Elektrot. 1914, 3. u. 4. Heft.

Derselbe, Erklärung der dielektrischen Nachwirkungen auf Grund Maxwellscher Vorstellungen. Arch. f. Elektrot. 1914, 9. Heft.

C. Lübben, Dielektrische Eigenschaften der Kabelpapiere. Arch. f. Elektrot. 1921, 8/9. Heft.

Addenbroke, The Electrician Bd. 82, I. 353.

Frigou, Augustin, Untersuchung der Verluste in gebräuchl. dielektr. Stoffen. Comptes Rendus 1922, S. 1338, u. a.

[2]) Porzellan leitet von 300° C an aufwärts und wird zu einem Elektrolyt. Das Faradaysche Äquivalenzgesetz wird festgestellt nach Arbeiten von F. Haber, A. Rieff und P. Voigt, Zeitschr. f. anorg. Ch., Bd. 57 (1908), S. 154.

Digitized by Google

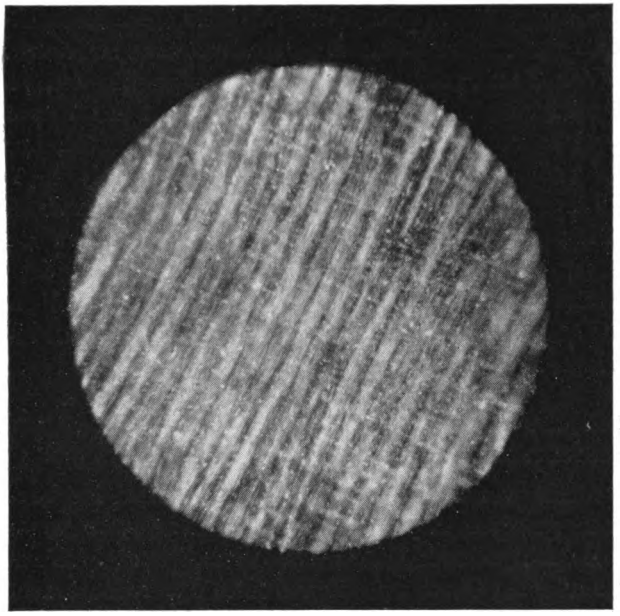


Abb. 26. Bakelitpapierrohr. 110fache Vergrößerung. Aufsicht.

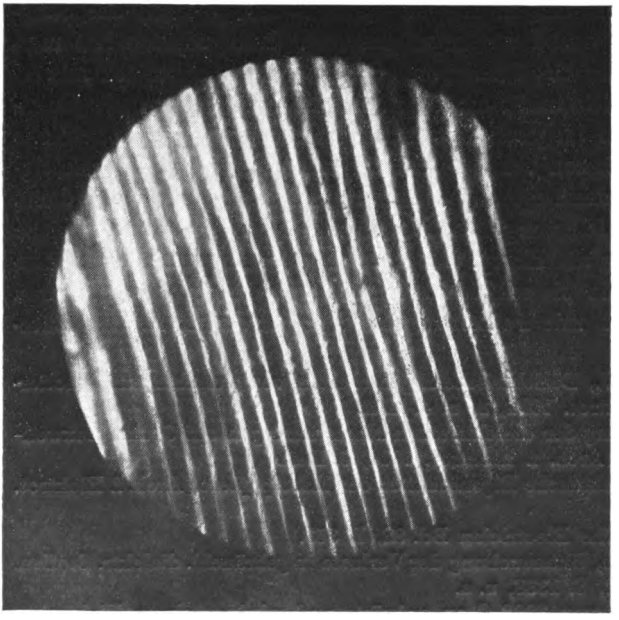


Abb. 27. Bakelitpapierrohr. 110fache Vergrößerung. Querschliff.

isolatoren, Durchführungen, Schalter- und Sicherungsteile. Die Hauptvorzüge der Papierdielektrika gegenüber Porzellan liegen darin begründet, daß die elektrische Festigkeit größer ist, ebenso die Widerstandsfähigkeit gegenüber mittlerenundhöheren Frequenzen. Ferner besteht bei der Verwendung von Hartpapier eine erheblich größere Sicherheit gegenüber Beanspruchung durch Stoß und Schlag. Es läßt sich außerdem Hartpapier leicht bearbeiten, was bei Porzellan überhaupt nicht in Frage kommt. Metalleinlagen können in Porzellannicht angebracht werden. Hartppaieristum die Hälfte leichter wie Porzellan, es hat ein spezifisches Gewicht von ungefähr 1,2 bis 1,3.

Digitized by Google

Die Biegungsfestigkeit für Rohre ist wesentlich höher wie beim Porzellan und beträgt bis zu 500 kg/qcm. Bei Porzellan rechnet man für Rohre mit einer Biegungsfestigkeit von rund 150 kg/qcm.

Bekannte Fabrikate von festen Papierisolierstoffen für Hochspannung sind das Repelit von S.SW., Carta und Spezialkarta der Continentalen Isola Werke, Pertinax von der A.-G. Meirowsky, Turbonit[1]) von Jaroslaws Erster Glimmerwarenfabrik, Haefelyt von der A.-G. Emil Haefely & Co., Geax von der A. E. G.[2]) usw.

Im Freien, wo die Witterungseinflüsse eine Rolle spielen, ist Porzellan natürlich zweckmäßiger wie imprägniertes Papier. Man soll Hartpapier nur in geschlossenen Räumen verwenden und die Oberflächen der Isolierkörper von Zeit zu Zeit von Staub reinigen.

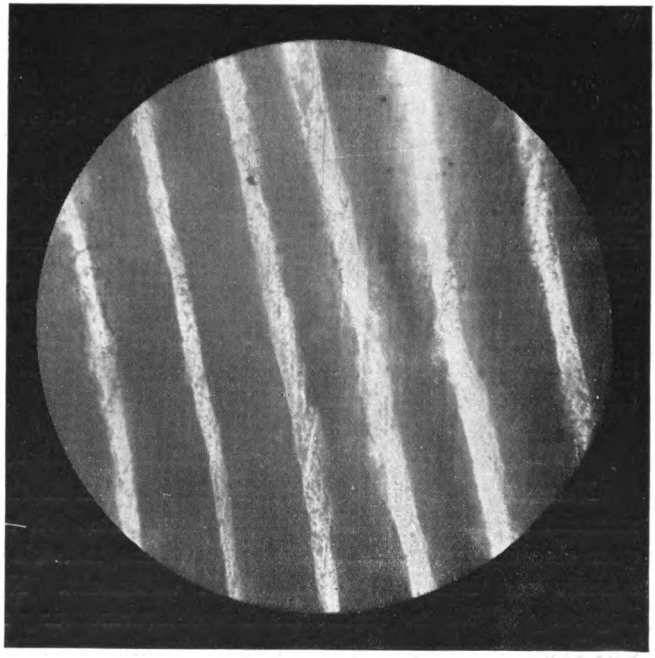


Abb. 28. Bakelitpapierrohr. 480fache Vergrößerung. Querschliff.

Um festzustellen, ob die Verbindung des Bakelits mit den Papierlagen einwandfrei erfolgt ist, kann man sich der mikroskopischen Betrachtung bedienen. In den folgenden Bildern handelt es sich um Aufnahmen, welche von Rohren (Spezialkarta) stammen, die mit Bakelitpapier gewickelt wurden. Man sieht genau die Schichtung und die innige Verschmelzung. Die dunklen Linien sind die Lacklagen. Abb. 26 stellt eine Aufsicht in schrägem Licht bei einer 110fachen Vergrößerung dar, in Abb. 27 sehen wir einen Dünnschliff bei derselben Vergrößerung und in Abb. 28 einen solchen bei 480facher Vergrößerung.

[1]) Turbonit. E.T.Z. 1923, S. 575.

[2]) Hartpapierfabrikate als hochwertige Isoliermaterialien in der Elektrotechnik. A.E.G.-Mitt. 1923, Nr. 8.

Digitized by Google

Besonders im letzteren Bilde erkennt man deutlich, wie ineinander übergehend sich die Fasern des Zellstoffs mit der Bakelitmasse verbunden haben[1]).

Über die Größe der Dielektrizitätskonstanten von Hartpapier hat das Telegraphen-Versuchsamt Feststellungen vorgenommen. Bei 20° wurde in trockenem Zustande bei Pertinax (Meirowsky) die spezifische Kapazität = 5,23 ermittelt, bei Spezialkarta (C.I.W.) = 4,32 und im Vergleich hierzu bei Hartgummi (S. & H.) = 2,11. Jaroslaw gibt an, daß ihr aus Papier und Bakelit hergestelltes Turbonit eine Dielektrizitätskonstante von 3,4 besitzt. Das aus Papier und Schellack gewickelte Haefelyt hat eine spezifische Kapazität von 4,2.

Man erkennt aus vorstehenden Angaben, daß Hartgummi infolge seiner niedrigen Dielektrizitätskonstante am günstigsten ist. Obige Zahlen beziehen sich auf trockenes Material. In feuchtem Zustande sind die Werte etwas größer.

Unvorteilhaft stellen sich die bei Wechselstrom eintretenden Verluste in Papierstoffen, verglichen mit denen in Hartgummi. Spezialkarta hat einen Verlustwinkel, welcher ungefähr 9 mal, Pertinax ungefähr 12 mal so groß ist wie beim Hartgummi. In feuchtem Zustande betragen diese Werte 50% mehr. Da die Wasseraufnahme guter Papierdielektrika in feuchter Luft immerhin noch bis zu Werten von 1% betragen kann, ist die Lackierung der Oberfläche unerläßlich. Die Wasseraufnahme von Hartgummi ist so gut wie Null.

70. Nichtgeschichtetes festes Papierdielektrikum.

Neuerdings ist es gelungen, aus Zellstoff ein Hochspannungsisoliermaterial herzustellen, welches nicht geschichtet ist, sondern längs wie quer eine homogene Struktur besitzt, Wärmegrade bis zu 160° dauernd aushält und kaltem wie heißem Öl widersteht. Nach 24stündiger Lagerung in Wasser macht die Gewichtsvermehrung nur 0,001% aus, eine Feuchtigkeitsaufnahme ist also nicht vorhanden. Die Biegungsfestigkeit beträgt 600 kg/qcm, die Druckfestigkeit 5000 kg/qcm. Bei dünnen Stücken hat die elektrische Festigkeit einen Wert von 15000 V/mm, bei dickeren von 10000 V/mm. Die Oberflächenisolation ist auch sehr gut.

Die Dielektrizitätskonstante beträgt 3,86 — 4,47, das spezifische Gewicht 1,3. Im Handel führt dieses neue Hochspannungsisoliermaterial den Namen Durax[2]).

Man kann daraus alle vorkommenden Arten von Isolierkörpern anfertigen, da sich Durax in beliebige Formen pressen sowie außerdem mit Werkzeugen leicht bearbeiten läßt.

[1]) Siehe auch die 265fach vergrößerten Ansichten von Bakelit-Hartpapierplatten in BBC-Mitt. 1922, S. 180.

[2]) Hersteller sind die Isola-Werke in Düren.

Digitized by Google

Mit der Herstellung eines derartigen einheitlichen Dielektrikums ist ein erheblicher technischer Fortschritt erzielt. Das Bindemittel wird viel homogener mit der Zellstoffasser verschmolzen. Man kann Schellack und andere Harze, wie vor allen Dingen Bakelit als Schmelzmittel anwenden. Es ist offensichtlich, daß eine vermehrte Vollkommenheit in bezug auf die gleichmäßige Gestaltung des Isolierkörpers zu einer günstigen Verteilung des elektrischen Feldes führt. Auch die Verarbeitungsmöglichkeiten von Durax sind bessere wie die der geschichteten Papierkörper. Störungen, welche die Lagen bei unentdeckt gebliebenen Fehlern verursachen, werden hier ausgeschaltet.

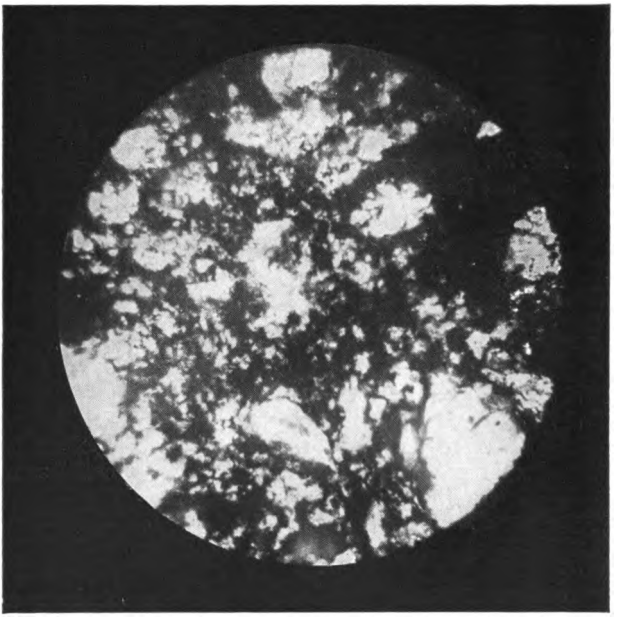


Abb. 29. Durax, 110fache Vergrößerung. Dünnschliff.

Abb. 29 zeigt einen Dünnschliff von Durax bei 110facher Vergrößerung, das Bild läßt die Verschmelzung der Zellstoffteilchen mit dem Bakelit gut erkennen.

71. Stützisolatoren.

Bei sehr hohen Spannungen kommt es nicht nur darauf an, daß die Durchschlagsfestigkeit gewährleistet ist, sondern es muß auch die Oberflächenisolation genügen. Sonst finden Funkenübergänge statt und leiten die Zerstörung des isolierenden Zustandes ein. Bevor der vollkommene Zerfall der Isolation durch Oberflächenbeschädigung vor sich geht, machen sich bestimmte einleitende Erscheinungen geltend, welche man als Streifenbildung, Glimmlicht, Büschellicht, Gleitfunken und Lichtbogen bezeichnet.

Durch die Ionisierung der Luft und die dabei entstehende salpetrige Säure wird die Masse angegriffen und rauh. Es tritt infolge der Aufrauhung Kondensation von Feuchtigkeit ein. Die Überschläge der Funken

Digitized by Google

werden durch eine beschädigte, in Kohlung übergehende Oberfläche wesentlich gefördert. Es ist daher notwendig, die elektrischen Isolierstoffe

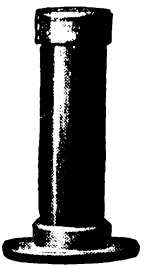
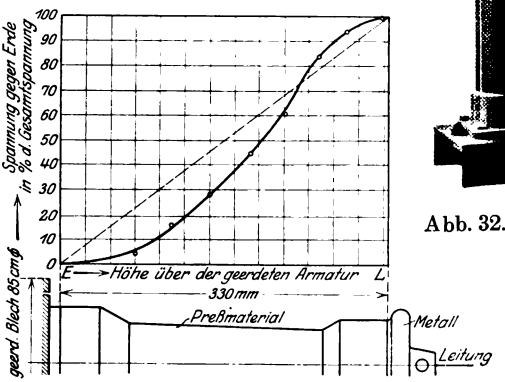
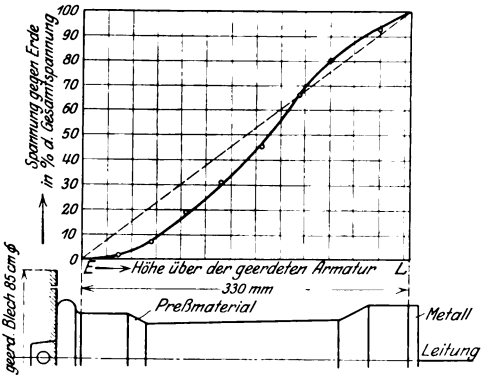


Abb. 30. Stützisolator aus Repelit.



Kurvenblatt A



Kurvenblatt B

Abb. 31. Spannungsverteilung an einem Stützisolator aus Durax. Betriebsspann. 35 kV, Prüfspann. 75 kV.

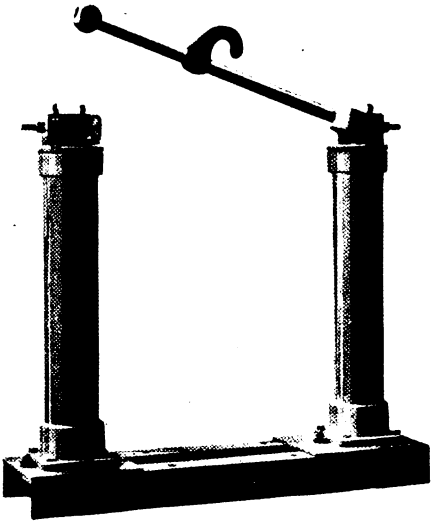


Abb. 32. Einpoliger Trennschalter für 65 kV mit Stützern aus Repelit.

in ihren Dimensionen so zu bemessen, daß sich keine Glimmerscheinungen bilden können.

In Abb. 30 ist ein Stützisolator der Firma S. SW. aus Repelit dargestellt, welcher für Betriebsspannungen bis 110 kV zulässig ist. Geprüft wurde der Isolator mit 220 kV. Sein Gewicht beträgt 19 kg bei einem Durchmesser von 16,7 cm und bei 90 cm Höhe.

Abb. 31 zeigt die Spannungsverteilung an einem Stützer aus Durax für 35 kV Betriebsspannung. Die Prüfspannung betrug 75 kV. Das erste Glimmen fand bei 110 bis 112 kV in stehender, liegender und umgekehrter Lage des Isolators statt.

Digitized by Google

Die Kurve der Spannungsverteilung wurde nach A. Schwaiger[1]) aufgenommen, jedoch die Potentialdifferenzen zwischen den auf den Isolator aufgezogenen Ringen sind mit einer Funkenstrecke ermittelt.

Das Kurvenblatt A zeigt die Spannungsverteilung bei der Nennspannung in normaler Stellung, das Kurvenblatt B bei dem auf den Kopf gestellten Isolator.

Abb. 32 veranschaulicht einen einpoligen Trennschalter von S. SW. für 65 kV, 200 Amp. Die Stützer sind aus Repelit.

72. Durchführungen.

Eine besondere Beachtung hat man den sogen. Hochspannungsdurchführungen zu schenken. Wenn Ströme hoher Spannungen durch Wände zu leiten sind, so bedarf es hierzu besonderer Konstruktionen. Diese Hochspannungsdurchführungen haben außerordentlich betriebssicher zu wirken, da es sonst zu schweren Störungen kommt.

Bei einer Transformatordurchführung soll der hochgespannte Strom aus dem Wandler heraus in die Netze, die Verteilungsstraßen der Energie, übergeleitet werden. Da die meisten Transformatoren mit Öl arbeiten, hat die Durchführungsklemme heißem Öl dauernd Widerstand zu leisten. Es ist schon gesagt worden, daß sich für diesen Zweck die mit Bakelit hergestellten Zellstoffdielektrika bewähren.

Man wickelt mit Bakelit imprägnierte Papierrohre und führt sie durch den Eisendeckel des Transformators. Die Rohrmitte wird durch eine Schelle oder sonst in geeigneter Weise mit dem Deckel fest verbunden. Durch diese isolierenden Bakelitpapierrohre werden die Metallleitungen gelegt, und der Hochspannungsstrom dem Wandler entnommen.

Je höher der Strom transformiert wird, um so unförmiger fallen die Durchführungsklemmen aus. Der am meisten elektrisch beanspruchte Teil derselben ist die Stelle des Rohres, welche die mit Erde verbundene Schelle trägt. Hier beginnt zuerst das Glimmen. Das Papierdielektrikum wird im vorliegenden Falle aber nicht nur auf Durchschlag hin belastet, sondern man kann sich leicht vorstellen, daß von der Schelle aus durch den elektrischen Druck Ionen gebildet werden, welche längs der Oberfläche der isolierenden Papierröhren zu Entladungen Veranlassung geben.

Oder man stellt sich die Durchführung als einen Kondensator vor, welcher von der Schelle und dem Leitungsdraht als Metallbelege sowie der Zellstoffmasse und der Luft als Dielektrikum gebildet wird. Es entsteht aber keine gleichmäßige elektrische Belastung des Materials. Wir denken uns ferner auf der isolierenden Oberfläche eine Parallelschaltung einzelner Kondensatoren, welche von Teilen der sich von

[1]) Schwaiger, A., ETZ. 1920, Heft 43.

Digitized by Google

der Schelle entfernenden Dielektrikummasse und der umgebenden Luft hervorgerufen werden.

Abb. 33 zeigt eine Durchführung für eine betriebsmäßige Spannung von 18 kV. Das Hartpapier bildet einen konischen Mantel, im Inneren ist Luft. Bei 47 kV schlägt der Funke im Inneren zwischen der Eisenstelle und dem Messingleiter über, ohne weiteren Schaden anzurichten. Die metallischen Kopfarmaturen sind stark ausgebildet.

Eine Hochspannungsdurchführung, welche statt des Luftmantels eine isolierende Füllmasse besitzt, gibt die Fig. 34 zu erkennen. In diesem wie in dem vorhergehenden Fall handelt es sich um Fabrikate der Isolawerke.

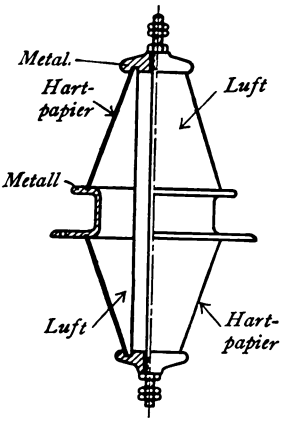


Abb. 33. Durchführung für 18 kV.

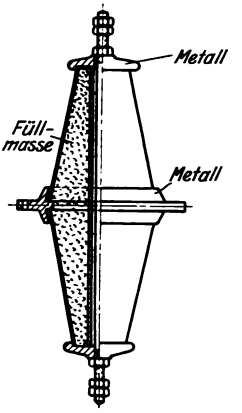


Abb. 34. Durchführung mit Füllmasse statt Luft.

Abb. 35. Durchführung aus Repelit für 50 kV.

In Abb. 35 ist eine Durchführung aus Repelit (S. SW.) für 50 kV Betriebsspannung dargestellt.

Verschiedenfach ist vorgekommen, daß die Leiter-Bolzen zerstört sind und abrissen. Ob dies lediglich infolge Mangels an mechanischer Fertigkeit erfolgt oder aber unter Mitwirkung des elektrischen Feldes, ist noch nicht vollständig geklärt. Bei Verwendung von Legierungen für die Bolzen, z. B. stark zinkhaltigen Kupfers, erscheint das letztere nicht ausgeschlossen.

73. Die Nagelsche Kondensatorklemme.

Eine sinnreiche Konstruktion einer Durchführungsklemme für sehr hochgespannten Strom verdanken wir R. Nagel[1]). Dieser ging in der Weise vor, daß er die Belastung im Dielektrikum durch das elektrische

[1]) Nagel, R., E.K.B. 1906, Heft 15, S. 215.

Digitized by Google

Feld gleichmäßig verteilt. Das Verfahren (D.R.P. 177667) wird von den Siemens-Schuckert-Werken in großem Maßstabe ausgeführt.

Die amerikanische Reynders-Durchführung, welche die Westinghouse-Gesellschaft verwendet, ist mit der Nagelschen Kondensatorklemme identisch.

Es werden bei der Herstellung der Rohre aus imprägnierten Papierlagen konzentrisch zur Achse Metallbelege eingewickelt, z. B. dünne Stanniolzylinder. Dadurch wird ein in sich geschlossener Leiter gebildet. Die Entfernungen dieser metallischen Einbettungen voneinander brauchen nicht gleich zu sein, ebenso nicht die Längen der Metallzylinder. Der eine Wert ist für den anderen bestimmend.

Baut man eine solche Durchführung, welche an der Schelle geerdet ist, in den Transformator ein, so bilden die Stanniollagen im Inneren der Klemme lauter hintereinander geschaltete Kondensatoren. Durch eine geeignete Auswahl der Längen und des Abstandes der Metallbelege voneinander lassen sich die Kapazitäten gleichmachen[1]). Da die Spannungsverteilung umgekehrt erfolgt wie die Kapazitäten, erzielt man auf diese Weise eine lineare Ausbreitung der elektrischen Belastung in der Klemme, und zwar radial zum Querschnitt. Ohne die metallischen Einlagen würde dicht am Durchführungsleiter eine das Isoliermittel sehr stark beanspruchende Schicht vorhanden sein, weil wir es hier nicht mit einem homogenen Felde zu tun haben. Man hatte deshalb früher die Klemme an der Befestigungsstelle auf dem Transformatordeckel schon sehr stark gemacht, ohne jedoch allzuviel Erfolg bei hohen Spannungen zu haben.

Führt man die Einlage nicht bis an die Oberfläche der Klemmen, läßt sich die Spannungsverteilung auf derselben dadurch ausgleichen, daß man axial Hilfsbelege anbringt, welche mit den Hauptbelegen leitend verbunden werden (D.R.P. 298384).

Oder man setzt Metallringe von ziemlich erheblichem Umfange auf die Enden der Belegungen, um die Papieroberfläche vor zu großen Felddichten zu schützen.

Durch Metallarmaturen, z. B. Zinkhauben, an den Enden der Klemmen wird die Belastung durch das elektrische Feld vorteilhaft ausgeglichen.

Hinsichtlich der zylindrischen Metalleinlagen ist noch anzuführen, daß diese in sorgfältigster Weise mit den Papierlagen verklebt sein müssen. Ist dies mangelhaft ausgeführt, entstehen bei längerer Betriebsdauer Störungen an den Grenzschichten und schließlich Abhebungen, Verkohlungen des Papiers und Durchschläge.

---

[1]) Schwaiger, A., Über die Berechnung von Kondensatordurchführungen. El.Be. 1923, H. 16, S. 185.

Digitized by Google

In Abb. 36 ist eine Kondensatorklemme abgebildet. Die Siemens-Schuckert-Werke stellen derartige Durchführungen bis 600 Amp. bei 150 kV Betriebsspannung her. Geprüft werden sie mit 300 kV. Das Gewicht beträgt 100 kg bei einem Außendurchmesser von 19,6 cm. Nach den Enden zu abgeschrägt, wie dies früher der Fall war, werden diese Klemmen jedoch nicht mehr. Das Bindemittel, welches die Papierlagen und die Metallbelege verklebt, ist Bakelit.

Abb. 36. Nagelsche Kondensatorklemme.

74. Die Kuhlmannsche und Palmsche Durchführungsklemmen.

Als isolierende Masse für die Durchführungsklemmen ist ein Dielektrikum geeignet, welches eine möglichst niedrige spezifische Kapazität besitzt.

Aus diesem Grunde konstruierte Kuhlmann[1]) Durchführungen, welche aus einem Porzellangerippe bestehen, das bei der Schelle stark ausgebaucht ist und nach dem Kopf zu konvex verläuft. Das Innere dieser Porzellanhülle besteht aus Luft oder wird mit Paraffin oder Öl ausgegossen oder mit sonst einem isolierenden Mittel von möglichst niedriger Dielektrizitätskonstanten. Porzellan besitzt die ziemlich hohe Dielektrizitätskonstante von ungefähr 5,6.

Neuerdings hat man Durchführungen gebaut, wo gewickeltes Papier und Preßmaterial miteinander verbunden sind.

Beachtenswert ist auch die von Palm[2]) konstruierte Durchführung für Spannungen von mehreren 100000 V. Hohle Porzellankörper mit geschliffenen Rändern werden unter Verwendung von getränktem Papier als Dichtungsmittel durch ein in ihrem Inneren zentrisch liegendes Metallrohr fest zusammengeschraubt. Das Rohr ist der Durchführungsbolzen, der Raum zwischen diesem und der Porzellanhülle wird mit Stickstoffgas angefüllt, welches unter einem Druck von 10 — 12 Atm. steht. Die Dielektrizitätskonstante des zusammengepreßten Stickstoffs ist rund 1, auch bei veränderlichen Temperaturen. Die elektrische Festigkeit des Stickstoffs geht bei steigendem Druck außerordentlich in die Höhe[3]) und wächst um das zehn- bis zwölffache.

Untersuchungen über die Dichtigkeit des hier verwendeten Hochspannungsporzellans[4]) haben ergeben, daß dieses für das komprimierte

[1]) ETZ. 1910, S. 51.

[2]) Palm, A., Ein absolutes Voltmeter für 250000 V Effektivspannung. Zeitschr. f. technische Physik 1920, Nr. 7. — Derselbe, Elektrostatische Hochspannungsanzeiger von Hartmann u. Braun. ETZ. 1922, S. 916.

[3]) Siehe S. 161.

[4]) Hermsdorfer und Schomburger Fabrikate.

Digitized by Google

Gas so gut wie undurchlässig ist. Innerhalb von 3 Wochen war der Druck von 13 Atm. auf 1.1 Atm. heruntergegangen, was aber mit Wahrscheinlichkeit nicht an der Porzellanmasse liegt, sondern an den Metallteilen. Wird das Porzellaninnere mit komprimiertem Stickstoff gefüllt, so tritt die Erscheinung auf, daß anfangs eine niedrigere Durchschlagsfestigkeit der Klemme vorhanden ist als später. Das gasförmige Dielektrikum scheint eine gewisse Zeit zu bedürfen, um zu seiner vollständigen Homogenität zu gelangen.

75. Die Haefelysche Luftmanteldurchführung.

Von der Baseler Firma Emil Haefely & Co., A.-G. werden Durchführungen hergestellt, welche unter der Schelle einen Luftmantel besitzen. Um die Wirkung dieser Konstruktion näher kennen zu lernen, sind im Petersenschen Laboratorium von Guido E. Haefely[1]) Untersuchungen dieser Klemmart angestellt.

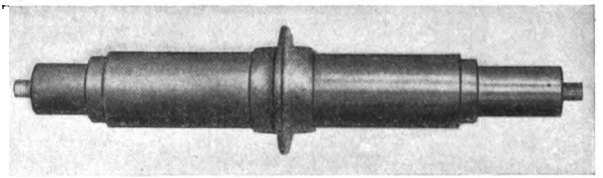


Abb. 37. Luftmantel-Durchführung von Haefely.

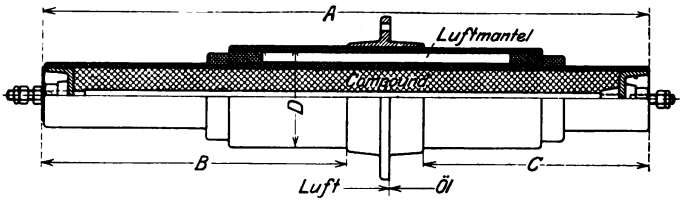


Abb. 38. Schnitt durch eine Haefelysche Luftmanteldurchführung.

Die ersten sichtbaren Erscheinungen bei der elektrischen Belastung, die Streifenentladungen, wurden ihrer Länge nach gemessen, und es wird festgestellt, daß sie linear mit den aufgedrückten Spannungen anwachsen. Wenn man sich unter der Schelle eine geringe Luftschicht denkt, so zeigt sich, daß der Beginn der Streifenentladung mit einer radialen Luftbeanspruchung von 11 kV/cm zusammenfällt. Dieser Wert ist keine Materialkonstante, denn er wurde außer an schellackiertem Papier noch beobachtet an Rohren und Walzen aus Guttapercha und Füllmassen, ebenso wenn Luft als Zwischenmittel dient. Bringt man einen hinreichend breiten Luftzwischenraum direkt unter der Schelle an, so ergibt sich, daß die Streifenspannung bedeutend heraufgeht, und die Überschlagsspannung erhöht wird.

In Abb. 37 ist eine derartige Luftmanteldurchführung abgebildet, Abb. 38 zeigt sie im Schnitt.

[1]) Haefely, Guido E., Studien an Durchführungen unter besonderer Berücksichtigung der Luftmanteldurchführungen. Diss. Darmstadt 1920.

Digitized by Google

76. Durchführungen aus Porzellan, Bakelitpapier und Füllmasse. Sillimanit.

In Abb. 39 ist das Innere dargestellt von einem Prüftransformator mit Ölfüllung von 250 kV Spannung und einer Leistung von 100 kW, Fabrikat der A.-G. Koch & Sterzel. Die Umformung erfolgt von

Abb. 39. Hartpapier allein und in Verbindung mit Porzellan beim Bau von Transformatoren (Koch & Sterzel A.-G.).

500 V Primärspannung bei wechselseitiger Erdung. Man erkennt, daß für den Bau eines solchen Wandlers sehr viel Isoliermaterial gebraucht wird. Die isolierenden Zylinder bestehen aus Spezialkarta. Sie sind 120 cm hoch bei einem Durchmesser von 90 cm. Auch die Stützen und Winkel sind aus Spezialkarta.

Die Durchführungsklemmen besitzen eine Länge von 220 cm. Sie bestehen äußerlich aus isolierendem Hartporzellan von der Freiberger

Digitized by Google

Porzellanfabrik. Der Porzellankörper ist der Größe halber aus verschiedenen Teilen zusammengekittet.

Das Innere dieser Porzellankörper hat in der Achse ein Messingrohr als Stromleiter. Auf dieses Rohr ist ein Zylinder aus Spezialkarta luftdicht aufgewalzt, außerdem sind noch verschiedene Spezialkartarohre konzentrisch hierzu gelagert. Die Zwischenräume zwischen diesem und der Porzellanhaut werden mit einer blasenfreien Füllmasse ausgefüllt, die aus Paraffin, Kolophonium und Wachs zusammengesetzt ist.

In Amerika hat man bei großen Durchführungen als Außenmantel Porzellan genommen und konzentrische Messingrohre als Kondensatorbelege hineingebracht. Die Zwischenräume werden mit einem Isoliermittel niedriger spezifischer Kapazität ausgegossen.

Auch ist man so vorgegangen, daß zur Vermeidung bedenklicher Feldstärken an den Rändern der Metallbelege die ganze Kondensatorklemme später noch in einen Zylinder aus Isoliermaterial, z. B. Preßmasse oder Hartpapier, gebracht wurde. Den Innenraum zwischen Durchführung und Zylinder füllt man dann mit einer isolierenden Ausgußmasse aus.

Die Beanspruchung V/cm in Kondensatorklemmen sowie in Durchführungen aus verschiedenerlei Nichtleitermaterial können wir durch Rechnung ermitteln[1]). Wir brauchen hierzu die Kenntnis der elektrischen Festigkeit der verwendeten Isolierstoffe und ihrer Dielektrizitätskonstanten. Die Formen der Klemme zerlegen wir uns in solche, deren Dimensionen rechnerischen Erwägungen bequem zugänglich sind.

Parallel geschaltete Kondensatoren ergeben eine Gesamtkapazität gleich deren Summe, hintereinander geschaltete Kondensatoren gleich der Summe ihrer Reziproken. Die auf die Einzelschichten entfallenden Potentialdifferenzen verhalten sich umgekehrt wie der Betrag ihrer Kapazitäten. Daraus läßt sich die Verteilung der Gesamtspannung auf die einzelnen Isolierschichten entnehmen. Auch die Beanspruchung V/cm jeder Stelle in den inhomogenen Feldern der Einzelschichten können wir ermitteln.

Die Rechnungen stimmen aber nur dann, wenn die Isolierstoffe durch und durch einheitlich in ihrem Gefüge sind. Ist dies nicht der Fall, sind alle Berechnungen sinnlos.

Isolierende Konstruktionen aus verschiedenartigen Dielektriken, z.B. aus keramischem Material, Hartpapier, Compounds u. a., und eventuell Leitern aufzubauen, erscheint zukunftsreich. Die jeweiligen Spezialfabriken hätten sich zweckmäßig zusammenzutun.

Wer einen Begriff von dem hohen technischen Wert der nichtleitenden Baustoffe bekommen will, sehe sich das Innere eines großen Transformators, Ölschalters oder ein modernes Umspannwerk an. Die Überfülle von stark beanspruchten Isolierstoffen wird den Beschauer

[1]) Bültemann, A., Leiter und Nichtleiter der Elektrizität. Helios 1918, S. 140.

Digitized by Google

belehren, daß eine entwickelte isoliertechnische Industrie eine Notwendigkeit für die Elektrotechnik ist.

Die Angaben über Hochspannungsdurchführungen sollen kurz durch den Hinweis auf Steinzeug[1]) als ein neuerdings hierfür mit Erfolg verwendetes Material vervollständigt werden.

Bei sehr großen Dimensionen, wo gewickeltes Papier, Porzellan und Steatit versagen, lassen sich Steinzeugdurchführungen (D.T.S.-Sillimanit $Al_2O_3 \cdot SiO_2$) z. Z. bis zu 3500 mm Länge mit guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften aus einem Stück herstellen. Steinzeug wird aus einer Tonsorte gebrannt, welche ohne Erweichung dicht zusammensintert, sehr bildsam ist und wenig schwindet. Nach F. Kock[2]) beträgt die Dielektrizitätskonstante von Sillimanit 5,17.

77. Das Verhalten von Hartpapierrohren unter Öl.

Die Kenntnisse des Verhaltens von spannungsbelasteten Papierrohren unter Öl ist von außerordentlicher Wichtigkeit für die Betriebssicherheit der Transformatoren.

Sicherlich werden auch eine sehr große Anzahl der Durchschläge und Zerstörungen der Transformatorisolationen nicht von dem Isoliermaterial selbst heraufbeschworen, sondern von der falschen Dimensionierung der Konstruktionen. Ebenso kann man behaupten, daß die Beschaffenheit des Öles durch unrichtig bemessene Formen der Dielektrika leidet. Entladungserscheinungen unter Öl führen zur Verkohlung der Bestandteile von Öl und vom Isolierstoff, es wird eine Molekularkondensation des Öls herbeigeführt.

Bei der Prüfung von Hartpapierrohren, welche unter Öl Streifenentladungen ausgesetzt waren, findet man bei der Herausnahme aus dem Öl oft mit dem Auge zunächst keine schädlichen Veränderungen. Indessen zeigen derartig beanspruchte Rohre häufig nach mehrtägigem Liegen an der Luft, daß einzelne Lagen sich von der festen Masse ablösen. Nach Entfernung der lockeren Papierwickelungen pflegt man bereits mit bloßem Auge feine dunkle Linien wahrzunehmen. Es scheint, daß Rohre, welche unter Öl bis nahe an ihre Durchschlagsgrenze belastet waren, bei einer späteren Dauerbelastung zugrunde gehen.

Es läßt sich daraus der Schluß ziehen, daß eine einmalige zu hohe Spannung scheinbar äußerlich dem Isoliermaterial noch nichts schadet, daß aber trotzdem Angriffsstellen entstehen, welche später bei längerer Benutzung mit betriebsmäßiger Spannung zu Störungen Veranlassung geben. Es ist die Ansicht vieler Transformatorenbauer, daß man es

[1]) Binz, A., Steinzeug und chemische Industrie. Zeitschr. f. angew. Chem. 1923, Nr. 43/44. — Singer, F., Die physikalischen Eigenschaften des Steinzeugs. Ebenda.

[2]) Die Keramik im Dienste der Elektrotechnik. Vieweg 1923, S. 992.

Digitized by Google

bei der Prüfung der Transformatoren nicht erst unter Öl zum Eintreten der Streifenentladung kommen läßt, auch nicht für kurze Zeit.

Daß die Streifenentladung an Papierrohren eine Zersetzung des Öls herbeiführt, hat G. E. Haefely festgestellt. W. Kehse[1]) berichtet, daß Streifenentladungen unter Öl von nur kurzer Dauer die elektrische Festigkeit der Hartpapierrohre verringern.

78. Kolloidaler Zellstoff.

Bei der Herstellung von elektrischen Isoliermaterialien kann man heutzutage die Kenntnis kolloidchemischer Vorgänge nicht mehr entbehren.

Kolloide sind Stoffe in kolloidalem Zustand. Es ist gegenüber den kristalloiden Stoffen das Merkmal der Kolloide, daß sie u. a. Scheinlösungen bilden und im allgemeinen nicht durch tierische Membranen oder Tondiaphragmen hindurch diffundieren. Man kann so mittels Dialyse Kolloide von Kristalloiden trennen.

Einen osmotischen Druck vermögen Kolloidlösungen kaum auszuüben. Aus übersättigten Lösungen scheiden sich im Gegensatz zu Kolloiden die molekular gelösten Körper in Form von Kristallen ab. Das Lösungsmittel, in welchem die Stoffe in kolloidalem Zustand sich in Lösung, genauer also in Scheinlösung, befinden, ist von wesentlicher Bedeutung.

Eine kolloidale Lösung ist mindestens aus zwei getrennt voneinander bestehenden Stoffen zusammengesetzt, nämlich einem flüssigen Körper und einem zweiten in dieser Flüssigkeit äußerst fein verteiltem festen oder auch flüssigen Stoff; es bildet sich also ein mehrphasiges heterogenes Gebilde. Man nennt die kolloiden Lösungen „Sole“ und entsprechend diejenigen, bei denen Wasser das Lösungs- oder Dispersionsmittel sind, „Hydrosole“. Ein Sol kann man durch Wärme, geeignete Zusätze oder mechanische Einwirkungen ausfällen, es verringert sich der Dispersitätsgrad.

Die sich ausscheidenden unlöslichen Körper bezeichnet man als „Gele“ und als „Hydrogele“, wenn sie z. B. aus Hydrosolen entstanden sind. Von Stoffen, die uns isoliertechnisch interessieren, kommen z. B. Schwefel, Kohlenstoff, Kieselsäure, Eis in kolloidalem und kristalloidem Zustand vor. Kautschuk und Harze kennen wir nur im kolloidalen Zustand. Suspensionen, kolloidale Lösungen und echte, also molekulare, Lösungen sind im Grenzzustande oft nicht voneinander zu unterscheiden; sie gehen dann ineinander über. Es handelt sich dabei um den Grad der Dispersität.

Bei den Suspensionen und Emulsionen beträgt die Größe der Teil-

[1]) Kehse, Walter, Beginn der Streifenentladung in Luft und unter Öl. ETZ. 1921, H. 38.

Digitized by Google

phasen mehr als 0,1 μ[1]), bei den kolloidalen Lösungen zwischen 0,1 μ und 1 $\mu\mu$, bei den Molekulardispersoiden und Iondispersoiden weniger wie 1 $\mu\mu$. Feiner Staub hat z. B. die Größe von 1 μ, man kann ihn nur unter dem Mikroskop erkennen.

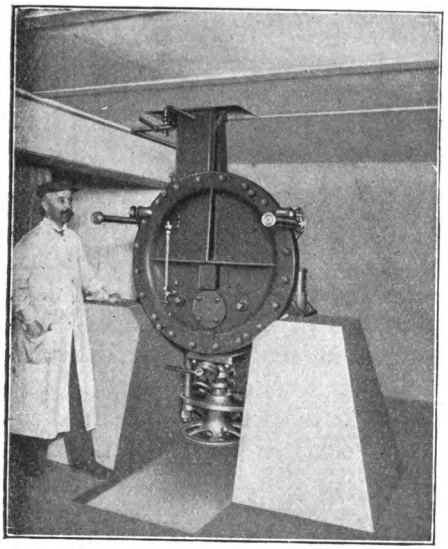


Abb. 40. Plausonsche Kolloidmühle für kolloidalen Zellstoff. Ansicht.

Die dispersen Phasen der Kolloide sind mit elektrischen Ladungen versehen, welche positiv oder negativ sein können, je nach der Art des Dispersionsmittels. So pflegen die im Wasser positiv geladenen Phasen im Terpentinöl mit negativen Ladungen versehen zu sein. Entsprechend sind die negativen Phasen in Wasser positiv geladen, in Terpentinöl auch manche Gummiarten.

Wie in den vorliegenden Ausführungen stets betont wurde, hat der Isoliertechniker den Mischungen seiner Massen eine große Aufmerksamkeit zu schenken. Die kolloidchemischen Zustände spielen bei diesen Aufbereitungen eine erhebliche Rolle, damit ein Dielektrikum von guten Eigenschaften zustande kommt.

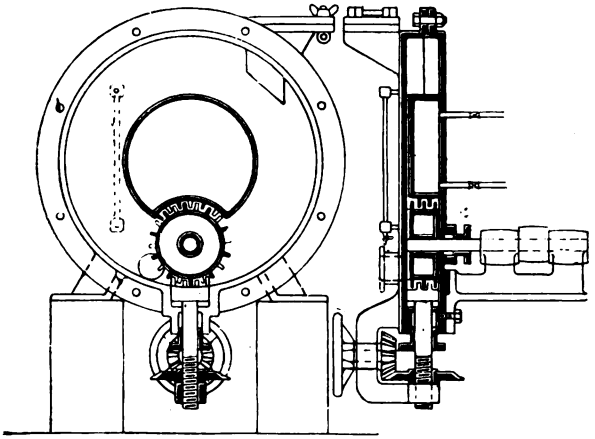


Abb. 41. Plausonsche Kolloidmühle für kolloidalen Zellstoff. Schnitt.

Neuerdings ist eine von Plauson konstruierte Vorrichtung bekannt geworden, um massenweise Körper in den kolloidalen Zustand überzuführen, wie dies früher technisch nicht möglich war. Zu diesen Stoffen gehört auch Zellulose. Ebenso ist es gelungen, Harze und

[1]) 1 μ = 0,001 mm; 1 $\mu\mu$ = 0,000 001 mm.

Digitized by Google

Glimmer mit Wasser als Dispersionsmittel in großem Maßstabe in den kolloidalen Zustand zu versetzen.

In Abb. 40 u. 41 sind Abbildungen einer Kolloidmühle wiedergegeben.

In einem ringförmigen Gehäuse ist eine Schlagtrommel angebracht, deren Arme oder Schläger sich dicht an einem Gegenstück vorbeidrehen. Wird die Mühle mit Harz, Sägemehl oder Zellstoff beschickt und als Dispergierungsmittel Wasser zugesetzt, so werden die Zellstoffteile durch die schnell rotierenden Schläger einer außerordentlich hohen Schlagwirkung ausgesetzt. Die Schlägergeschwindigkeit beträgt 60 m in der Sekunde und mehr.

Das Wasser ist nicht elastisch, sondern wirkt wie ein Amboß, auf welchem durch die drehenden Arme das Mahlgut zerrissen und

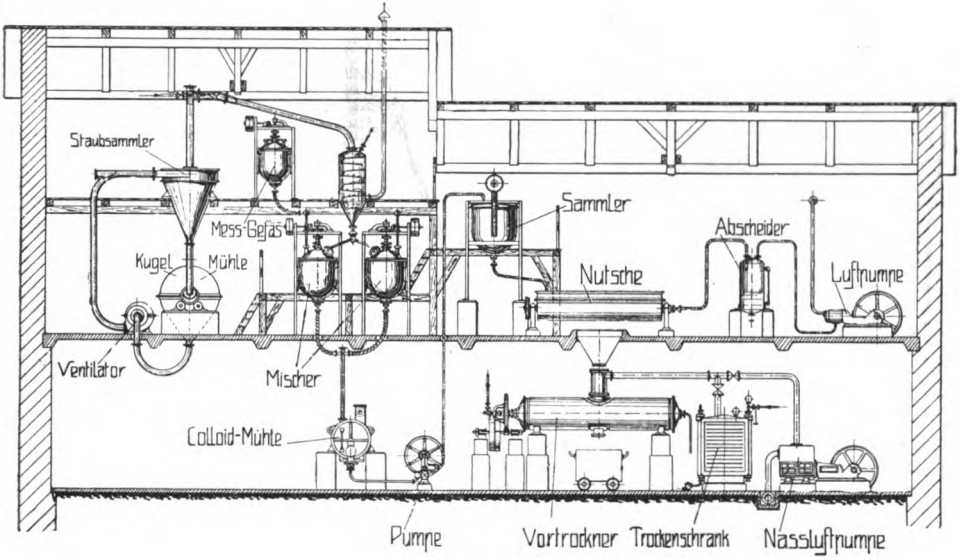


Abb. 42. Anlage zur Herstellung von kolloidalem Zellstoff für elektrische Isolierstoffe.

zerstäubt wird. Beim Zellstoff wirkt die in dieser hygroskopischen Substanz befindliche innere Feuchtigkeit aufschließend mit, indem sie die Faser beim Zusammenschlagen der Teilchen explosionsartig zerreißt. Ebenso trägt die Wärme, welche bei dem Müllereiprozeß entsteht, dazu bei, die Festigkeit des molekularen Aufbaus herabzudrücken. Ferner machen sich Erscheinungen elektrischer Art bemerkbar, besonders wenn das Dispersionsmittel ein Nichtleiter ist, oder wenn elektrisch nichtleitende Stoffe dem Zellstoff zugesetzt werden, z. B. Harze u. dgl. Durch die Aufladungen der kleinsten Teilchen mit Reibungselektrizität werden diese auseinandergehalten und die weitere Teilung ermöglicht.

Digitized by Google

Wie Berthold Block[1]) in einem Vortrag auf der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Chemiker im September 1920 berichtet, wurden elektrisch isolierende Platten aus kolloidalem Zellstoff angefertigt, welche bei einer Stärke von 3,5 mm sich bei 55000 V noch nicht durchschlagen lassen. Es fand Überschlag der Funken über eine Strecke von 160 mm der Platten statt. Das spez. Gewicht solcher Platten beträgt 1,2, die Zerreißfestigkeit der Kolloid-Zellstoffplatten ist 5 bis 10 mal so groß wie die von Holz, sie wurde = 300 bis 500 kg/qcm ermittelt.

Abb. 42 zeigt eine Anlage zur Herstellung von kolloidalem Zellstoff.

79. Vulkanfiber.

Behandelt man Zellulose oder Papier mit Chlorzink oder konzentrierter Schwefelsäure, so werden die Fasern in eine quellbare Masse übergeführt, die sich unter hohem Druck zu einem festen Körper verdichten läßt. Man bezeichnet solche Massen als Vulkanfiber.

Die Herstellung kann unter Benutzung der Pappenmaschine geschehen, indem die mit Schwefelsäure behandelten und dann tüchtig ausgewaschenen, nicht geleimt gewesenen Papiere lagenweise um heiße Zylinder aufgewickelt und fest zusammengepreßt werden. Damit die Umwandlung des Zellstoffs in Hydrozellulose gefördert wird, setzt man die Massen längere Zeit nach der Auswaschung der Luft aus.

In elektrischer Beziehung ist Vulkanfiber ein wenig zuverlässiges Material, welches nur in trockenen Räumen Isolation besitzt. Es ist stark hygroskopisch, quillt in Wasser und springt bei plötzlicher Einwirkung der offenen Flamme knallend auseinander. Es gibt hartes und biegsames Material. Die Bearbeitung von Vulkanfiber ist gut, die Festigkeit und Zähigkeit sind vorzüglich.

Erwärmung verträgt Vulkanfiber auf die Dauer nicht, ohne daß die mechanische Beschaffenheit leidet. Die Masse büßt dann an Festigkeit ein und wird brüchig. In Spezialfällen, auch bei Schwachstrom, wird Vulkanfiber für elektrische Isolierzwecke noch verarbeitet.

80. Die Jute.

Von den Faserstoffen sind Zellulose, Papier und Asbest besprochen. Für elektrische Isolierzwecke werden in großem Maßstabe noch Jute, Baumwolle, Hanf, Leinen, Flachs und Seide verwendet.

Jute ist die Bastfaser mehrerer Arten von Corchorus. Sie wird in Gegenden mit feuchtem tropischem Klima angebaut, u. a. in Ostindien. Die abgeschnittenen Pflanzen behandelt man ähnlich wie Flachs, indem man sie im Wasser röstet und die Faser mit der Hand

[1]) Z. angew. Chem. 1921, S. 25.

Digitized by Google

von den Stengeln entfernt. Die Länge der Fasern beträgt 1,5 bis 5 mm, bei einer Dicke von 2 — 2,5 hundertstel Millimeter. Man erkennt Jutefaser unter dem Mikroskop daran, daß das Zell-Lumen verschieden weit ist. Mit Jodschwefelsäure färbt sich die quer durchgeschnittene Faser nicht blau, sondern gelb. Die Jute wird besonders in der Kabelindustrie vielseitig benutzt.

81. Die Baumwolle.

Baumwolle kommt, wie die Jute, ebenfalls aus dem Auslande zu uns. Die Faserlänge schwankt zwischen 20 — 35 mm, bei weniger guten Sorten geht sie bis auf 6 mm zurück. Die Faserdicke beträgt zwischen $^1/_{70}$ — $^1/_{20}$ mm. Es sind die Samenhaare der verschiedenen Arten von Gossypium, welche das Gespinst darstellen, das wir mit Baumwolle bezeichnen. Die eiförmige, nußgroße Frucht wächst an mehrjährigen Stauden, welche $^1/_2$ — $1^1/_2$ m hoch werden. Sie springt bei der Reife auf und läßt die langen weißen, elastischen Samenhaare herausquellen. Da es der Baumwolle schadet, wenn sie in der aufgesprungenen Fruchtkapsel Regen abbekommt, werden die Früchte schnell gesammelt und von der Umhüllung und den Samenkernen befreit. Dann gelangt die Baumwolle in den Fabrikationsprozeß der Spinnerei.

Man erkennt ihre Faser unter dem Mikroskop daran, daß sie plattgedrückte Bänder darstellt, welche schraubenähnlich gedreht sind. Ebenso kann man Baumwolle daran feststellen, daß die Faser beim Zusatz von Kupferoxydammoniak Einschnürungen zeigt.

Die Verwendungsmöglichkeit von Bauwollwaren und Baumwollgeweben als elektrisch isolierender Gerüststoff ist eine äußerst umfangreiche und vielseitige.

Wie G. Dettmar[1]) feststellte, können baumwollumsponnene Drähte ruhiger Lage noch gut bis 95° C Verwendung finden, Erschütterungen ausgesetzte vielleicht noch gerade eben. Bei 115° C in Luft zeigt sich, daß die Baumwollumspinnungen, welche ruhig lagen, nach 200 Stunden schwach, nach 500 Stunden reichlich und nach 1000 Stunden stark gebräunt waren, teilweise sogar vollständig verkohlt.

L. Schüler berichtet über Untersuchungen im Materialprüfungsamt an nicht imprägniertem Baumwollgarn bei 90°, 100°, 110° und 120° C und zwar bis zu Dauererwärmungen von 150 Tagen und Lagerung in Harzöl, Mineralöl sowie in Luft. Die Temperaturerhöhung und die Zeit deren Einwirkung setzen die Zerreißfestigkeit, welche als Maßstab für die Festigkeit des Materials gewählt wurde, bedeutend herab. Für die Verwendung nichtimprägnierter Baumwolle in ruhenden Maschinenwicke-

[1]) ETZ. 1900, S. 727.

Digitized by Google

lungen schlägt Schüler als höchstzulässige Temperatur 85° C, in beweglichen Wickelungen 75° C vor, für Baumwolle unter Öl 105° C.

H. Schering neigt auf Grund von Arbeiten in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu der Auffassung, daß Durchschläge in Öltransformatoren bei höheren Temperaturen nicht in der Eigenschaft der Baumwolle selbst zu suchen sind, sondern in deren Zerstörung durch oxydierende Einflüsse wie salpetrige Säure, Glimmentladungen und Ölsäuren.

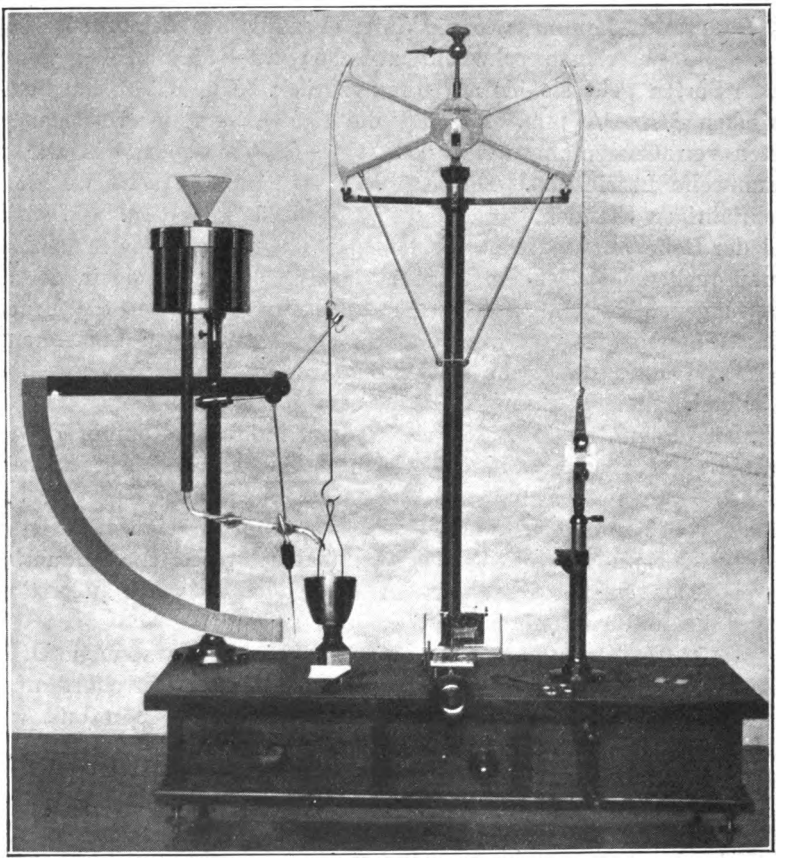


Abb. 43. Apparat zur Bestimmung der Reißfestigkeit, Dehnung und Drehfestigkeit nach Prof. Dr. P. Krais.

C. H. Möllering[1]) hat Gespinste und Einzelfasern von Jute, Baumwolle, Tramaseide, Tussahseide und Kupferseide bei Temperaturen von

[1]) Über die Einflüsse höherer Dauererwärmungen auf textile Isolierstoffe. Untersuchung aus dem Mech.-Technol. Inst. der Dresdner Techn. Hochschule. El. Be. 1923, S. 134.

Digitized by Google

20°, 75°, 105° und 135° C, trocken und naß, bis zu 120 Stunden Wärmeeinwirkung untersucht. Die Bruchfestigkeitswerte wurden nach Abkühlung auf Zimmertemperatur bei Gespinsten mit dem Schopperschen Zerreißapparate vorgenommen, bei Einzelfasern mit einem von P. Krais[1]) vorgeschlagenen selbstregistrierenden Apparat, wie ihn Abb. 43 veranschaulicht. Jute und Baumwolle nehmen anfänglich mäßig an Festigkeit ab, bei rund 100° C steigen aber die Verluste erheblich an und wachsen mit der Zeit.

Tramaseide unterliegt der Erwärmung schneller wie Jute und Baumwolle, die Tussahseide, vom Tussahspinner erzeugt, ist etwas widerstandsfähiger. Am wenigsten widerstandsfähig zeigt sich Kupferseide[2]).

82. Hanf, Leinen und Flachs.

Hanf, Leinen und Flachs haben große Ähnlichkeit hinsichtlich ihrer Aufbereitung und Verwertung. Der Flachs wird gewonnen aus den losgelösten Bastfasern der Stengel von Linum. Diese sind ziemlich gerade, glatt und walzenförmig und weisen einen Längskanal auf, der unter dem Mikroskop wie eine Linie erscheint. Charakteristisch ist für die Flachsfaser, daß sie eine glatte oder rauhe Spitze bildet. Der Hanf sieht ähnlich aus wie Leinen oder Flachs. Er spielt aber mehr ins Gelbliche hinein. Während die Querschnitte der Flachsfaser Bastzellen zeigen, die von geraden Linien gebildet werden, sind diese Linien beim Hanf gekrümmt. Der als feine Linie beim Flachs erscheinende innere Kanal, das Zell-Lumen, erweist sich beim Hanf wesentlich ausgeprägter. Hanffaser ist gröber und fester wie die Flachsfaser und deshalb für feinere Gewebe weniger geeignet. Vor dem Kriege hatte Rußland die größte europäische Hanfproduktion.

83. Die Seide.

Die Seide ist nicht pflanzlicher Herkunft und daher auch nicht aus Zellstoff aufgebaut, sondern sie besteht dem Hauptbestandteil nach aus Fibroin. Man kann diesen aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff ($C_{13}H_{23}N_5O_6$) zusammengesetzten Körper dar-

[1]) Textile Forschung. Dresden 1921, H. 2, S. 86.

[2]) Neuerdings sind aus dem Mechan.-Technolog. Inst. der Dresdner Techn. Hochschule folgende praktisch wertvolle Arbeiten hervorgegangen: Der Einfluß hoher Dauererwärmungen in Luft und Stickstoff auf die Arbeitseigenschaften nicht imprägnierter und imprägnierter Isolierbänder (Gneist), der Einfluß der Erwärmung auf die Arbeitseigenschaften der Isolierbänder vor und nach der Imprägnierung (Böhner), der Einfluß höherer Dauererwärmungen auf die Festigkeitseigenschaften tierischer Fasern, vor allem Wolle und Seide (Tröger). Geh.-R. Ernst Müller wird in der „Leipziger Monatsschrift für Textil-Industrie" zusammenfassend über diese Arbeiten berichten.

Digitized by Google

stellen, wenn man die rohe Seide mit Natron behandelt und so den Seidenleim entfernt, dann auswäscht und die Masse trocknet. In Kupferoxydammoniak löst sich das Fibroin. Die Seide, welche als Sekret aus den Spinndrüsen von Raupen hervorgeht und dann erhärtet, bildet zwei parallel laufende zusammengeklebte einheitliche Fäden. Man kann sie an dieser Zweiteiligkeit unter dem Mikroskop erkennen.

84. Die Behandlung der Gewebe mit Leinöl und Lacken.

Um die Gespinste und Gewebe in elektrische Isolierstoffe überzuführen, müssen sie mit hochwertigen isolierenden Massen derartig verbunden werden, daß ihre Fasern völlig damit durchtränkt sind. Lösungsmittel, welche zum Eindringen der Dielektrika in die Gewebeporen benötigt werden, sind wieder vollkommen aus der Masse herauszuschaffen, da sonst die Isolation leidet.

Von isolierenden Mitteln, welche man zur Tränkung von Geweben benutzt, werden genannt: Gummilösungen, Harze wie Schellack, Kolophonium u. a., ferner Wachse, Paraffin, fossile und künstliche Kohlenwasserstoffe wie Asphalte u. a., Kondensationsharze, Öle, vor allem Leinöl, Lacke[1]) der verschiedensten Art. Es entstehen so isolierende Gewebe, welche je nach dem Imprägniermittel verschiedenartige Eigenschaften besitzen.

Hanf und Flachs liefern sehr festes Isoliergewebe, Baumwolle ist von geringerer Festigkeit. Was die Wärmebeständigkeit anlangt, so halten Baumwollgewebe vorübergehend Temperaturen bis 120 Grad aus, Seide dagegen ist temperaturbeständiger. Man kann Isolierseide bis zu 150 Grad Wärme eine kurze Zeit aussetzen. Allerdings sprechen sich andere Versuchsansteller gegenteilig aus. Wenn der Ausdruck „Isolierleinen" gebraucht wird, so ist häufig kein Leinen oder Hanf damit gemeint, sondern oft ein Baumwollprodukt.

Um aus Baumwollgewebe oder Gaze ein isolierendes Tuch herzustellen, zieht man den Stoff maschinell durch Leinöl und läßt ihn dann auf Walzen trocknen, wobei ein evtl. vorhandenes Lösungsmittel sich verflüchtigt. Die Imprägnierung kann man mehrere Male mit Öl vornehmen.

Um die Fäserchen im Gewebe unschädlich zu machen, so daß sie sich bei der Behandlung mit Öl auf der Oberfläche des Tuches nicht aufrichten können und Mangel an Glätte hervorrufen, pflegt man das

[1]) Flight, W. S., Die Untersuchung von Isolierlacken. El. Review 1921, Bd. 89, S. 771. Ref. ETZ 1922, S. 848.

Seeligmann-Ziecke, Handbuch der Lack- und Firnisindustrie.

Wolff, Dr. Hans, Die Harze, Kunstharze, Firnisse und Lacke. Sammlung Göschen, 1921.

Digitized by Google

Baumwollgewebe vor der Tränkung mit Stärke zu behandeln und dann zu kalandrieren. Auf diese Weise wird später beim Tränken mit Ölen eine glatte Oberfläche des Isoliertuches erzielt.

Um den Isolierbändern, wie sie zum Umwickeln oder Umspinnen benutzt werden, eine erhöhte Festigkeit beim Wickeln zu verleihen, schneidet man die Bänder nicht parallel dem Webschuß in Streifen, sondern man schneidet sie unter einem Winkel aus. Es entstehen die sogen. Diagonalbänder, welche wesentlich größere Zerreißfestigkeit aufweisen. Jedoch ist beachtlich, daß bei zu großer Anspannung der Fall eintreten kann, daß die Vierecke des Gewebes zu Rhomben verzerrt werden, in welchen die inkrustierten Isolierstoffe Risse bekommen. Man hat daher mit dem Anziehen der Diagonalbänder in bestimmten Grenzen zu bleiben.

Wie schon ausgeführt wurde, werden die Gewebe zwecks Erhöhung der elektrischen Isolierfähigkeit oft mehrmals nacheinander imprägniert z. B. mit Leinöl. Hat ein solcher Stoff nach der ersten Tränkung z. B. bei 0,2 mm Stärke eine Durchschlagsfestigkeit von etwa 7000 V, so steigt dieselbe nach zweimaligem Behandeln mit Öl auf ungefähr 9 — 10000 V und nach dreimaliger Tränkung auf 11 — 12000 V. Legt man mehrere Lagen übereinander, wächst die Durchschlagsfestigkeit ebenfalls nicht proportional an. Selbstverständlich ist achtzugeben, daß die Lagen fest verklebt werden.

Die mechanischen Eigenschaften der Öltuche spielen neben den elektrischen natürlich ebenfalls eine große Rolle. So muß das isolierende Gewebe Knicke vertragen können, ohne daß hierdurch eine wesentliche Beschädigung des Tuches wie der Isolierfähigkeit eintritt.

Das Tuch soll eine gewisse Elastizität besitzen und darf nicht vorzeitig reißen.

Die Vorteile der Seidenisolierstoffe bestehen u. a. darin, daß sie dünner sind und an Isolierfähigkeit die Baumwollgewebe übertreffen. Ein Seidentuch, einmal mit Leinöl getränkt, hat bei 0,1 mm Stärke eine ungefähre Durchschlagsfestigkeit von 7 — 8000 V, bei zweimaliger Tränkung ungefähr 10000 V. Was hinsichtlich der diagonalen Ausschneidung der Streifen bei den Baumwollstoffen gesagt ist, gilt auch bei Seide wie bei Leinen- und Hanfgeweben.

Leinen, Hanf und Jute liefern Isoliertuche, welche mechanisch fester sind wie solche aus Baumwolle und Seide.

Von den Imprägniermitteln der Gewebe haben die Lacke besondere Bedeutung. Es ist von großer Wichtigkeit für die Beschaffenheit der isolierenden Stoffe, welche Lacksorte für ihre Herstellung verwendet wird.

Die Lacke dringen in die porösen faserigen Tuche ein und übertragen ihre gelösten Bestandteile auf die Faser. Zugleich soll unter

Digitized by Google

den Fasern selbst durch die Lackablagerungen eine fest zusammenhaftende gleichmäßige Schicht hergestellt werden. Wählt man zum Tränken der Fasern sogenannte flüchtige Lacke, also solche, deren feste Bestandteile in Benzol, Benzin, Terpentinöl, Alkohol usw. gelöst sind, so entsteht die isolierende und die Fasern verbindende Schicht dadurch, daß man das Lösungsmittel verdunsten läßt.

Man handelt unter Umständen vorteilhaft, diesen mit flüchtigen Stoffen hergestellten Harzlösungen noch Auflösungen solcher Harze in trocknenden Ölen, wie z. B. in Leinöl, hinzuzufügen. Solche Lacke werden als Öllacke oder fette Lacke bezeichnet. Es tritt also in dem getränkten Gewebe zunächst Verdunsten des Lösungsmittels ein, dann bleibt das noch weiche Gemisch von Harz und vegetabilem Öl auf der Faser zurück. Dieses wird dann unter dem Einfluß des Sauerstoffs der Luft in den Gewebefasern oxydiert und fest. Bei diesem Prozeß tritt wahrscheinlich infolge der Wirkungen des Lichts eine molekulare Kondensation der harzigen Stoffe hinzu.

Will man das Festwerden der Lacke im Isoliertuch beschleunigen, kann man das Leinöl dadurch vorbehandeln, daß man es in Firnis verwandelt. Das Trocknen zur festen Substanz erfolgt dann schneller.

Man kocht für die Firnisbereitung das Leinöl mit geeigneten Metallverbindungen, wie z. B. Mangansalzen, harzsaurem Kalk u. dgl. und bewirkt dadurch, daß die erhärtende Haut innerhalb 24 Stunden entsteht. Auch durch Kochen, Lufteinblasen und die Einwirkung von Ozon kann man Leinöl in Firnis überführen. Auf der Faser bildet sich die feste Schicht in der Weise, daß der Trockenprozeß von außen nach innen verläuft.

Anders wie Öllacke verhalten sich Lösungen von Bakelit, von Zellon und von Holzöl. Diese Stoffe erhärten nicht durch die Einwirkung des atmosphärischen Sauerstoffs, sondern infolge eines in der Masse vor sich gehenden chemischen Prozesses oder durch Verdunsten des Lösungsmittels.

Die Herstellung von guten Isoliertuchen und von brauchbaren Imprägnierlacken setzt langjährige Erfahrungen voraus.

In dem sog. Emailledraht[1]) hat man die Gespinstfaser ganz ausgeschaltet. Es ist Draht, welcher lediglich von einer Lackschicht umhüllt ist, indem er mehrere Male durch Lackbäder gezogen wird. Gegenüber Faserbekleidung zeigt sich der Unterschied einer geringeren Schichtdicke der Isolation und erhöhter Widerstandsfähigkeit gegen Hitze und Feuchtigkeit. Man vereinigt auch Gespinste mit Emaille, indem man z. B. blanke Drähte mit einer Schicht Lack versieht und dann mit Gespinst umgibt. Sehr oft spielen bei der Verwendung Preisfragen mit.

[1]) Meyer, Dr. Georg J., Die Prüfung von Emailledrähten. ETZ. 1923, H. 35. — F. Lefevre, Emailledraht, Ref. Dr. M. Klein, ETZ. 1923, S. 214.

Digitized by Google

85. Vergleiche zwischen Isolierpapier und Isoliergeweben.

Vergleicht man isolierende Gewebe mit isolierendem Papier, so findet man, daß die Papiere eine höhere Durchschlagsfestigkeit aufweisen können. So wurde Isolierpapier der Dicke von 0,09 mm bzw. 0,13 mm bei 6700 bzw. 9000 V durchschlagen, Baumwolltuch von 0,13 bzw. 0,18 mm bei 6200 bzw. 8500 V. Diese Zahlen sind aus fünf angestellten Prüfungen als Mittelwerte entstanden. Zum Tränken wurden ofentrocknende Lacke verwendet. Die Faserstoffe waren nur einmal durch den Lack gezogen, dann bei Zimmertemperatur erwärmt, und darauf bei 110° in den Ofen gebracht. Die Stärke des verarbeiteten Papiers war 0,04 mm, des Baumwollgewebes 0,08 mm.

Die Untersuchung auf elektrische Durchschlagsfestigkeit wurde wiederholt, nachdem sowohl das Isolierpapier wie auch das isolierende Baumwolltuch 10mal über einen 2 mm starken Dorn hin- und hergezogen waren, ferner nach scharfer Falzung der Isolierstoffe. Es wurde festgestellt, daß sich kaum Unterschiede gegenüber früher ergeben.

Bei der Spannungsprüfung war die eine Elektrode eine mit Gummi gepolsterte Unterlage aus Stanniol, die andere Elektrode bestand aus einem polierten Messingzylinder von 1 qcm Grundfläche, belastet mit 1 kg Gewicht.

Weiterhin wurde untersucht, wie sich die beiden isolierenden Stoffe, Papier und Baumwolle, nach 24stündigem Lagern in 10%iger Schwefelsäure und in 10%iger Salpetersäure verhalten. Es ergibt sich, daß die elektrische Festigkeit in beiden Fällen um ungefähr $^1/_4$ des früheren Wertes abgenommen hat. In Salpetersäure ist die Abnahme noch etwas größer.

Setzt man die beiden Stoffarten einer 24stündigen Einwirkung von Wasserdampf aus, so hat die Durchschlagsfestigkeit beider Materialien gegenüber dem Verhalten im trockenen Zustande um ungefähr 2—3 % abgenommen.

Werden die lackierten Papier- und Baumwollbänder einer Temperatur von 150° ausgesetzt und zwar 24 Stunden lang, so zeigt sich, daß die elektrische Festigkeit bei beiden Stoffen fast um ein Drittel zugenommen hat. Erfolgt die Erwärmung der isolierenden Faserstoffe nicht in Luft, sondern in Transformatorenöl, nimmt die Durchschlagsfestigkeit bei 150° um die Hälfte zu.

Eine Steigerung der elektrischen Festigkeit läßt sich herbeiführen, wenn die Isolierbänder zwei oder mehrere Male durch den Lack gezogen werden. Das lackierte Papier schlug bei doppelter Tränkung bei 11000 bzw. 16000 V durch, die beiden Baumwollgewebe bei

Digitized by Google

10500 bzw. 14500 V. Sämtliche elektrischen Prüfungen wurden bei einer Zimmertemperatur von 16—19° C vorgenommen und bei einem Feuchtigkeitsgrad der Luft von 65—75 %.

86. Prüfung von isolierenden Geweben.

Es ist wichtig zu ermitteln, ob die Faser der Gewebe dauernd unverändert erhalten bleibt und keinen Angriff durch den Lack erleidet, was z. B. durch einen Säure- oder Chlorgehalt des Lacks eintreten kann. Die Oberfläche blanker Kupferdrähte darf nicht oxydiert werden. Grünspanbildung hat nicht aufzutreten, wenn Kupfer mit lackiertem Baumwolltuch umwickelt und dann dem direkten Einfluß der Witterung ausgesetzt wird.

Bei den vorher beschriebenen Faserstoffen Papier und Baumwolle wurde auch diese Prüfung vorgenommen und dabei festgestellt, daß keine Grünspanbildung stattfindet.

Die Herstellung von isolierenden Geweben für elektrische Zwecke hat industriell einen bedeutenden Umfang angenommen, der Verbrauch von Geweben und Fäden in der Kabeltechnik allein ist sehr groß.

87. Metallisolatoren.

Im folgenden wird auf eine bestimmte Art von Freileitungsisolatoren hingewiesen, die man als Metallisolatoren bezeichnen kann.

In der Internationalen Gesellschaft der Elektriker hielt L. Neu[1]) im Jahre 1918 zu Paris einen Vortrag über Leitungsisolatoren, welche dadurch hergestellt werden, daß keine keramische Masse wie Porzellan oder Glas zur Anwendung kommt. Sondern eine Metallhaube und eine Metallstütze werden voneinander durch ein hochisolierendes Mittel, wie z. B. Asphalt oder Paraffin, verbunden. Anreiz für diese Konstruktion war die Erkenntnis, daß es eine ganze Menge Dielektrika gibt, welche sowohl hinsichtlich ihrer Durchschlagsfestigkeit, ihres Isolationswiderstandes sowie des geringen Wertes ihrer Oberflächenleitung das Porzellan wesentlich an Güte übertreffen[2]).

Es wurden vergleichende Untersuchungen angestellt mit einem aus 2 Mänteln bestehenden Porzellanisolator und einem Isolator dadurch gekennzeichnet, daß man eine Kupferhaube mit Schwefel ausgießt, in welche ein Metallbolzen als Stütze mit eingeschmolzen wird.

Bei einer Meßspannung von 410 V ergeben sich folgende Isolationswiderstände:

In trockener Luft ist bei beiden Typen der Isolationswiderstand derselbe und zwar größer als 500000 Megohm. Diese Werte ändern

[1]) Bull. de la Soc. Intern. des Electriciens, Bd. 8, 1918, S. 83.

[2]) Siehe die Tabellen auf Seite 175, 176 u. 177.

Digitized by Google

sich aber in feuchter Luft. Bei einem Feuchtigkeitsgrad von 90% zeigt der Widerstand des Metallisolators noch immer mehr wie 500000 Megohm, der Porzellanisolator aber nur noch 40000 Megohm.

Setzt man beide Typen dem Regen aus, so daß dieser senkrecht die Isolatoren trifft, ergibt die Messung bei dem Metallisolator 70000 bis 140000 Megohm, bei Porzellan jedoch nur 6000—7000 Megohm. Regen, welcher unter 45° auf die Isolatoren fällt, bewirkt für den Metallisolator einen Isolierwiderstand von 70000—90000 Megohm. Bei dem Porzellanisolator ist er auf 1300 Megohm gesunken.

Die Feststellung der Kapazitäten bei Anlegung eines Wechselstroms von 6000 V bei 41 Per/sec zeigt für den Metallisolator einen Wert von 0,00002 Mikro-Farad, bei dem Porzellanisolator von 0,00004 Mikro-Farad, also das Doppelte.

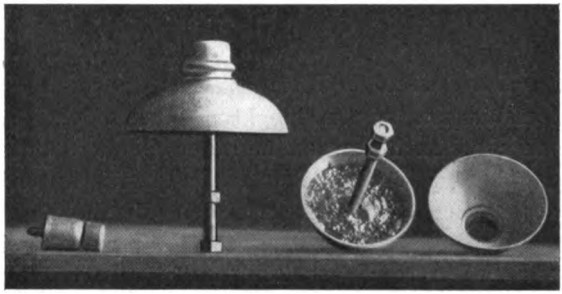


Abb. 44. Metallisolator.

Ferner ist untersucht worden, wie sich die beiden Isolatortypen verhalten, wenn sie mit höheren Spannungen belastet werden. Die Potentialdifferenz wurde zwischen Halsrinne und Eisenstütze angelegt, man ließ sie allmählich anwachsen, bis sich ein Lichtbogen bildet. Die Frequenz betrug 42 Per/sec. In trockener Luft hört man beim Metallisolator von 10000 V an ein Geräusch im Inneren, der Überschlag der Funken zwischen Mantel und Stütze beginnt bei 16000 V, der Lichtbogen entsteht bei 18000 V.

Stellt man diese Versuche in feuchter Luft an, indem Regen unter einem Winkel von 45° auf die Leitungsisolatoren trifft, so bildet sich beim Porzellanisolator der Lichtbogen vom Mantel zur Stütze bei 9—10000 V, beim Metallisolator beginnen die Funken bei 9—10000 V überzugehen und bei 11—11500 V kommt es zum Lichtbogen.

Wenn man derartige Metallisolatoren nach dem Bericht von L. Neu anfertigt, findet man, daß sie nur wenig mechanische Festigkeit besitzen, denn Schwefel ist ein sehr sprödes Material und die übrigen Bindemittel sind es auch.

Es ist aber möglich, diesem Mangel abzuhelfen, indem die Erfahrung verwertet wird, welche man bei der Herstellung von Preßstoffen für elektrische Isolierzwecke gemacht hat. Um die spröden Dielektrika, wie Harze, Asphalte, Schwefel usw. gegen Druck, Stoß und Schlag zu einer ganz außerordentlich festen Masse umzuformen,

Digitized by Google

bringt man einen Faserstoff in die Schmelze und verfährt dabei, wie dies früher beschrieben wurde. Abb. 44 gibt ein Bild dieser Isolatoren.

Vergleicht man Metallisolatoren mit solchen aus Porzellan, so ist ein Hauptnachteil der ersteren, daß sie erweichbare Bestandteile haben. Aber als Vorzüge kann man ihnen anrechnen, daß sie in kurzer Zeit herzustellen sind und durch äußere Einflüsse wie Schlag und Stoß nicht oder kaum zerstört werden können.

Daß Metallisolatoren in irgendwie namhafter Weise Porzellan zu ersetzen vermögen, ist wohl nicht anzunehmen. Aber immerhin ist denkbar, daß für manche Spezialzwecke, z. B. bei Vorhandensein von großer Feuchtigkeit, derartige Freileitungsisolatoren mit Metallmantel eine zweckmäßige Verwendung finden können.

88. Schlußwort.

Das Gebiet der Dielektrika ist im vorstehenden hauptsächlich vom technologischen Standpunkt aus behandelt. Eine Darstellung, welche den Stoff auch nur annähernd erschöpft, konnte nicht gegeben werden, denn es hätte ein Vielfaches der Ausführungen[1]) bedurft. Die Vorträge sind daher Stückwerk geblieben, teils ohne rechten Zusammenhang.

Denjenigen Kreisen, welche gezwungen sind, elektrische Isoliermaterialien zu verarbeiten, und den Ingenieuren, welchen die gewerbliche Herstellung der Dielektrika obliegt, wird wahrscheinlich selbst aus der lückenhaften Berichterstattung zum Bewußtsein gekommen sein, daß hier noch eine Fülle von wirtschaftlich bedeutungsvollen Aufgaben zu lösen ist.

Möchte sich die Erkenntnis durchsetzen, daß der Nichtleiter als ein ebenso wichtiger Baustoff der elektrischen Technik anzusehen ist wie die Leiter, von deren weiterer Vervollkommnung aber keine erheblichen Fortschritte mehr zu erwarten sind. Die Betriebssicherheit von Maschinen, Apparaten und Anlagen hängt jetzt in höherem Maße vom Dielektrikum ab wie vom Metall.

Leistungsgrad und Lebensdauer der elektrischen Erzeugnisse sind bedingt von den Neuschöpfungen in der Isoliertechnik.

---

[1]) Infolge verzögerter Drucklegung konnten noch einige neuere Quellenangaben durch Fußnoten nachgetragen werden.

Digitized by Google

VI. Gummi, Guttapercha und Balata.

Von **H. Jaehn.**

Wohl über kein Material herrscht so große Unklarheit, wie über den Kautschuk und seine Gewinnung, und ist es daher wohl von Interesse, ehe ich auf die Verwendung des Gummis als Isoliermaterial eingehe, einiges über den Ursprung und die Herstellung des Kautschuks zu erwähnen.

Die Gummigewinnung im tropischen Amerika, Indien und Afrika war den Eingeborenen sicher schon vor Jahrhunderten bekannt. Die Gambibas machten am Amazonasstrom schon in vorkolumbischer Zeit ihre Gefäße aus „Caucho"; andere Stämme verfertigten aus dem Gummi Spritzen, welche den Namen Seringas führten, worauf wohl der portugiesisch-brasilianische Name Pao des seringa für den Kautschukbaum und Seringueiros für die Gummisammler zurückzuführen ist. Die Neger Afrikas benutzten Kautschuk zur Bekleidung der Holzschläger für Tamtams. Auf Haiti sah Kolumbus während seiner zweiten Entdeckungsreise 1493 bis 1496 die Eingeborenen mit Kautschukkugeln spielen. 1736 legte der französische Forscher La Condamine der Akademie der Wissenschaften in Paris einige Kautschukstücke vor und beschrieb den „Paragummi" und die Verwendung durch die Indianer des Amazonenbeckens und bezeichnete den Baum als „Heve". Hierauf ist wohl der für diese Pflanzen festgelegte Name „Hevea-Brasiliensis" zurückzuführen.

Die Ersten, die im Amazonastal den Gummi ausbeuteten, waren die Portugiesen; sie führten in Lissabon in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts aus Gummi gefertigte Hüte, Stiefel, Säcke aus Brasilien ein. 1770 stellte der Engländer Priestley fest, daß man mit Kautschukstücken Bleistiftstriche ausreiben kann und ist wohl auf diese Eigentümlichkeit der noch heute gebräuchliche Name „India Rubber" zurückzuführen.

Die Urwälder Süd-Amerikas und Afrikas haben lange die Welt mit den erforderlichen Mengen Rohgummi versorgt. Auch heute noch kommt der beste Gummi aus Brasilien vom Amazonastal über den Verschiffungshafen Pará und wird nach diesem Hafen der Wildkautschuk, welcher von der Hevea Brasiliensis herstammt, Pará genannt.

Die Einführung der Fahrräder, der Kraftwagen, sowie die ungeheuren Mengen Rohgummi, welche die Elektrotechnik verbraucht, ferner die kolossale Preissteigerung für Rohgummi in den Jahren 1908 bis 1910 legten den Gedanken nahe, die Gummibäume in Plantagen zu ziehen. Die Berechtigung dieses Gedankens wurde nicht nur aus dem Wunsch

Digitized by Google

hergeleitet, den zu erwartenden größeren Bedarf zu decken, sondern auch aus der Tatsache, daß die Gewinnung des wilden Kautschuks kostspielig, die der auf Pflanzungen erzielten Ernte billig ist.

Der Kautschuk, im lateinischen „gummi elasticum", ist eine vegetabilische Kohlenwasserstoffverbindung, die gewonnen wird aus dem Saft, den das Protoplasma der sogenannten Interzellulargänge bei einer großen Anzahl von Bäumen, Sträuchern und Schlinggewächsen, die in heißen Ländern vorkommen, absondert. Die Hauptadern dieses Zellengewebes liegen im innern Ringe zwischen der Rinde und dem Cambium. Wenn man in die Rinde der Gummigewächse einen Einschnitt macht, so entfließt ihnen ein der Ziegenmilch ähnlicher Saft, Latex genannt, in dem der Kautschuk als mikroskopisch kleine Kügelchen schwimmt. Diese Kügelchen trennen sich, wenn der Latex sich selbst überlassen bleibt, von der wässerigen Flüssigkeit und bilden an der Oberfläche eine Art Rahm, wie dies bei sauer gewordener Milch bekannt ist. Dieses Gerinnen des Latex wird auf verschiedene Weise künstlich hervorgebracht und bezeichnet man den Vorgang mit „koagulieren". Der Gehalt an Kautschuk im Latex ist sehr verschieden; der mustergültigste Latex, der von Pará, setzt sich ungefähr zusammen aus:

32 % reinem Kautschuk,
22 % organischen, also der Fäulnis unterworfenen und mineralischen Bestandteilen,
54 bis 56 % Wasser,
der Rest zugesetzter Ammoniak und Harz.

Auch im gemäßigten Klima kommen Pflanzen mit Milchsaft vor, doch enthält dieser Saft entweder gar keinen Kautschuk oder eine so geringe Menge, daß eine Ausbeutung sich nicht lohnt.

Man kennt mehr als 300 Arten Pflanzen, welche Gummi liefern, von denen etwa 85 hauptsächlich ausgebeutet werden, und von diesen ederum nur ein Teil in Anpflanzungen.

Die Gummipflanzen sind tropische Gewächse, die etwa 30 Grad nördlich und südlich vom Äquator in Amerika, Afrika, Asien und Australien wachsen. In den einzelnen Ländern sind es Pflanzen verschiedener Art, die besonders gut gedeihen.

Aus Tabelle 1 sind die Hauptfamilien und Arten, sowie deren Vorkommen ersichtlich.

Die Menge des Milchsaftes ist nicht nur bei den verschiedenen Arten verschieden, sondern auch vom Alter der Pflanzen, der Bodenbeschaffenheit und vielem anderen abhängig. Während die Hevea Brasiliensis erst nach einem Wachstum von 7 bis 10 Jahren ausgebeutet wird und erst nach 25 Jahren die Höhe ihrer Ergiebigkeit erreicht, wird die Manihot schon mit 6, einige Fikusarten schon mit 5 Jahren ertragsfähig.

Digitized by Google

Tabelle 1. Gummipflanzen.

Familien	Art	Vorkommen Amerika	Afrika	Asien	Australien
Euphorbiaceen	Hevea brasiliensis	Pará, Südwesten des Amazonenstroms			
	Hevea sprucena	Brasilien, Venezuela Peru bis in die Andentäler			
	Hevea discolor	Nebenflüsse des Amazonas (Rio Negro, Rio Yapura)			
	Hevea Caoutcha	Brasilien (Matto Grosso)			
	Manihot Glaciovii	Nord-Brasilien, Ceara			
	Sapium verum	West-Ecuador Südwest-Kolumbia			
	Euphorbia Intici		Süd-Madagaskar		
Apocinaceen	Vahea toxicophlea		Madagaskar		
	Landolphia owariensis		Kongogebiet, Liberia		
	Landolphia Klainci		Mittel- und Ost-Afrika		
	Landolphia Handelotti		Franz. Sudan, Senegal		
Apocinaceen	Clitandra Arnoldiana		Kongogebiet		
	Kickxia elastica		Ostafrika		
	Willoughbeia edulis		Madagaskar	Ind. Archipel	Australien
	Willoughbeia firma			Bengalen, Java Singapor, Sumatra Malaische Inseln	
	Hancornia speciosa	Pernambuco, Peru			
	Hancornia minor	Rio de Janeiro Rio Negro			
Moraceen (Artocarpeen)	Castilloa elastica	Mexiko, Kolumbien, Ecuador, Mittel-Amerika, Antillen, Martinique,			
	Castilloa Ulei	Südl. Amazonas			
	Artocarpus integrifolia			Assam, Birma	
	Ficus elastica			Assam, Birma Sumatra, Malakka Java	
	Ficus rubiginosa			Java, Sumatra Ind. Archipel	Australien
	Ficus pertuse	Guadaloup			
Asclepiadeen (untergeordnete (Kautschukpflanzen)	Callotropis gigantea		Franz. Sudan	Assam, Batavia	
	Periploca graeca		Réunion		

Digitized by Google

Die Züchtung der Pflanzen geschieht meist aus Samen. Ein Teil des Urwaldes wird abgeholzt, die Stümpfe und störenden Gewächse verbrannt und der Samen einfach in die Erde eingesenkt. Nach 3 bis 4 Wochen erscheint die Pflanze, die nach einem halben Jahr eine Höhe von mehreren Metern haben kann, und nach einem Jahr 4 bis 6 Meter. Nach 5 Jahren haben die Bäume schon eine Höhe von etwa 15 Metern, bei einem unteren Stammumfang von 1 bis 1,2 Meter.

Die nachstehenden Abbildungen zeigen:

Abb. 1, eine halbjährige Hevea, gepflanzt zwischen liberischem Kaffee, der den jungen Gummipflanzen etwas Schatten gewähren soll.

Abb. 2, eine 1jährige Hevea.

Abb. 3, eine Heveaplantage, Pflanzen aus Samen gezogen, $1^1/_2$ Jahr alt.

Abb. 1. Halbjährige Hevea.

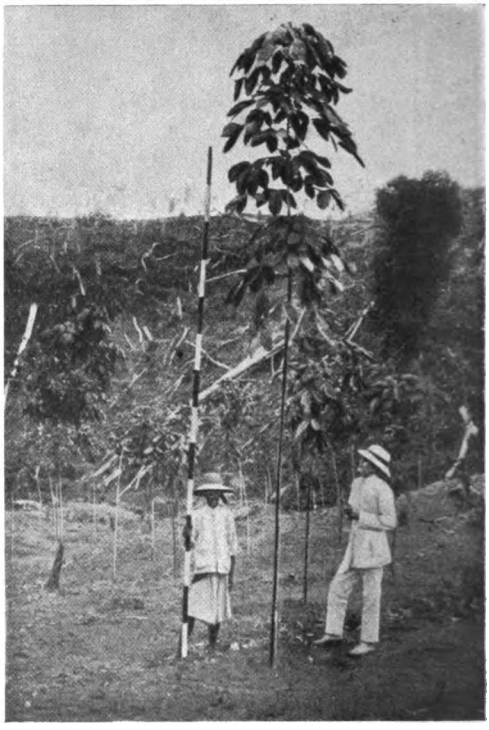


Abb. 2. Einjährige Hevea.

Um den Milchsaft, den Latex, zu gewinnen werden die Bäume durch Einschnitte angezapft. Dieses Anzapfen geschieht in der Weise, daß mittels geeigneter Messer die Rinde bis auf die milchhaltige Ringschicht des Baumes durchschnitten wird, ohne das Cambium zu beschädigen.

Die Art der Schnitte ist sehr verschieden und unterscheidet man

Digitized by Google

vornehmlich den Y-Schnitt, den Grätenschnitt ⋿ und den halben Grätenschnitt ⋿.

Beim ersten Anzapfen wird nur eine schmale Schicht weggenommen, am nächsten Tage der darunter liegende Streifen und so fort bis die ganze Rinde abgeschält ist. Am Fuß des Baumes befindet sich, da wo die senkrechte Rinne endet, eine kleine Rinne aus Zinkblech oder aus einem halben Bambusrohr, welche in die Rinde eingesteckt ist. Am Ende ist ein Gefäß, welches in den Faktoreien aus Glas oder Porzellan besteht, während die Eingeborenen bei der Gewinnung von Wildkautschuk Blechnäpfe oder halbe Kokosschalen verwenden. In einem Jahr wird die vordere Hälfte des Baumes gezapft, im nächsten Jahr die hintere Hälfte und so abwechselnd, damit die Rinde ohne Schädigung des Baumes wieder nachwachsen kann.

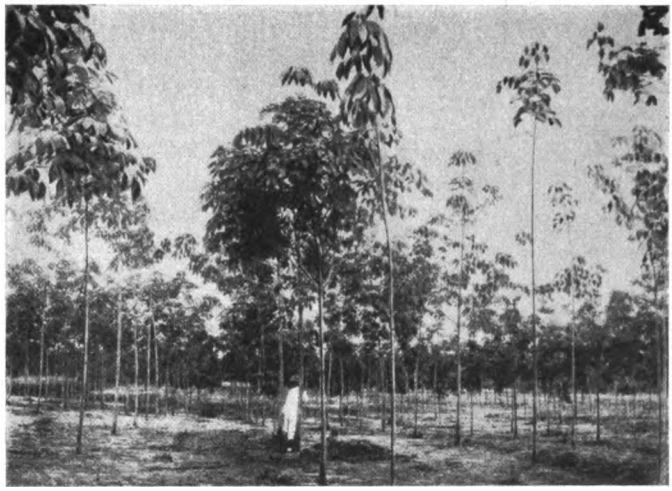


Abb. 3. Hevea-Plantage, $1^1/_2$ Jahr alt.

Das Gerinnen des Latex kann erfolgen durch Wärme, durch Räucherung, durch Abschöpfen nach Verdoppelung der Flüssigkeit durch heißes Wasser, durch chemische Zusätze, und zwar durch Zusatz von reagierenden Mineralien oder Säuren oder Säure enthaltenden Pflanzen.

Die Gerinnung durch künstlich erzeugte Wärme oder durch Räucherung kommt hauptsächlich am Amazonenstrom bei der Herstellung von Paragummi zur Anwendung, also bei der Herstellung des Gummis, der wegen seiner Reinheit, Haltbarkeit und Elastizität von allen Arten am meisten geschätzt wird. Die hervorragende Güte des Para ist wohl auch auf das Alter der wild wachsenden Bäume wie auf die Selbstdüngung des Urwaldbodens zurückzuführen. Der Gummisammler nimmt von den angezapften Bäumen einen Becher nach dem andern

Digitized by Google

ab, entleert ihn in einen Eimer und befestigt die Becher jedesmal wieder an der alten Stelle. Der durch die natürliche Wärme am Baum bereits geronnene Latex, der sogenannte Scraps, wird abgenommen und in grobmaschigen Netzen vom Sammler mitgenommen.

Der Eingeborene nimmt nun in seiner Hütte den Saft und gießt ihn über einen Holzknüppel oder Bambusstab. Er hält den Stab über einen Räucherapparat, den sogenannten Fumiro, der auf einer in der Erde ausgehöhlten Feuerstätte steht. Dieser trichterförmige Apparat hat nur den Zweck, den Rauch aus verbrannten Palmennüssen der Urucury-Palme zusammen zu halten und zu einer engen Rauchsäule zu konzentrieren.

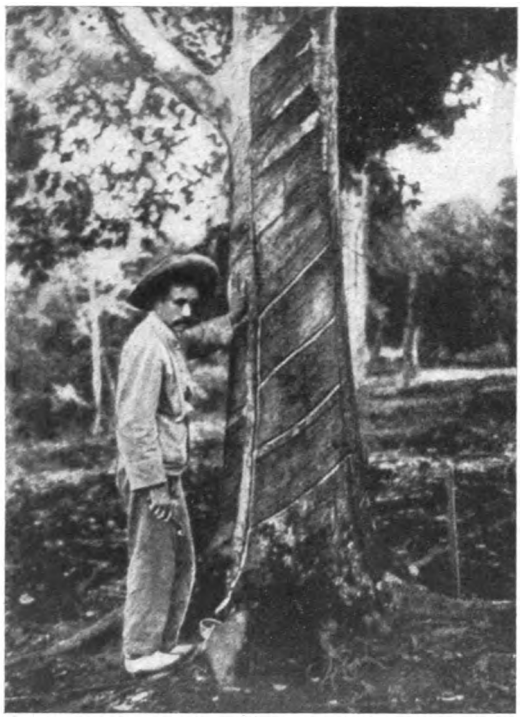


Abb. 4. Das Anzapfen einer 13jährigen Hevea.

Die Milchschicht, die an der Stange klebt, gerinnt unter dem Einfluß der Wärme fast augenblicklich, das Wasser verdampft und die erste dünne Kautschukhaut ist fertig. Nun gießt der Räucherer die zweite Schicht Latex auf die erste, räuchert wieder und so fort bis ein solcher Ballen entsteht, wie Abb. 5 zeigt. Zum Schluß wird der Ballen etwas längere Zeit geräuchert, dann der Länge nach aufgeschnitten und von der Stange entfernt, zum Verpacken wohl auch jede Hälfte nochmals durchgeschnitten.

Auf der Schnittfläche des Paraballens kann man deutlich die einzelnen Lagen erkennen. Man unterscheidet eine sehr reine dunkle Para, welche man mit dem Namen „Para fine hard cure" bezeichnet und eine zweite, welche im Innern bereits am Baum koagulierten Kautschuk enthält; dieser Gummi ist weniger gut und führt den Namen „Para enterfin" oder „soft fine"; derselbe ist etwas heller. Charakteristisch für den geräucherten Gummi ist der Geruch nach Speck.

In den Plantagen werden hauptsächlich außer den am Baum be-

Digitized by Google

reits koagulierenden Scraps sogenannte Crepes und Sheets hergestellt. Zur Herstellung der Crepe läßt man den Latex in großen Becken koagulieren und walzt auf Waschmaschinen mit geriffelten Walzen die abgeschöpfte Kautschukmenge zu Fellen von etwa 30 cm Breite und etwa 3 m Länge aus, die in großen Räumen an der Luft getrocknet werden. Die Sheets hingegen werden in kleinen Becken koaguliert und auf Waschmaschinen mit glatten Walzen zu dünnen Fellen ausgewalzt, dann aufeinander gelegt und zu glatten oder gerippten Platten gepreßt, die nachher in der Räucherkammer geräuchert werden.

Die handelsübliche Bezeichnung der verschiedenen Gummisorten ist nicht überall einheitlich und gibt Tabelle 2 die wichtigsten Arten an.

Abb. 5. Räuchern von Parakautschuk.

Die Tabelle 3 zeigt die Steigerung der Welterzeugung und des Weltverbrauchs von Rohkautschuk und auch das Verhältnis des Wildkautschuks zum Plantagenkautschuk. Durch die in den letzten Jahren im Plantagenbau eingetretene Überproduktion ist eine Entwicklung in den Weltmarktpreisen eingetreten, die niemand für möglich gehalten hätte. Rohkautschuk ist wohl der einzige wirtschaftlich bedeutende Rohstoff, der trotz der in allen Ländern eingetretenen Verringerung des Geldwerts sich im Preise auf fast gleicher Höhe gehalten hat, ja sogar gegenüber 1914 in letzter Zeit stark gesunken ist.

So war z. B. der Preis für Para 1914 etwa 2 sh 11 d
und für First Latex „ 2 „ 6 „
Ende März 1923 aber für Para 10¾ „
und First Latex 7¾ „
englische Währung für 1 lbs (engl. Pfund)[1]).

[1]) Ende Juli 1923 Para 1 sh 4 d, First Latex 1 sh 3 d.

Digitized by Google

Tabelle 2. Rohgummisorten.

Handelsbezeichnung	Ursprung	Pflanzenfamilien	Form	Farbe
Para fine hard cure	Amazonas	Hevea	große Ballen, halbiert oder geviertelt	dunkelbraun bis schwarz
Para soft fine Para enterfine	„	„	„ „ „ „ „	innen hell, außen dunkel
Bolivia Para	Prov. Bolivia	„	„ „ „ „ „	
Negro-heads (Cameta)	„	„	handgroße Stücke	schwarz
Mattogrosso	Prov. Mattogrosso (Brasilien)	„	Brote von 60 × 30 × 16 cm	hellbraun
Ceara Scraps (Manicoba)	Prov. Ceara (Brasilien)	Manihot	kleine Streifen, die zu Klumpen geballt sind	bernsteinfarben
Mangabeira (Pernambuco Biscuits)	Prov. Bahia und Pernambuco (Brasilien)	Hancornia	große, rechteckige Lappen bis 10 cm dick	rötlich und orangegelb
Peruvian balls	Peru	Hevea, Hancornia	handgroße Stücke zusammengeballt	schwarz
Guayule	Ecuador	Castilloa	große Lappen bis 5 cm stark	dunkel bis schwarz
Gambia balls	Senegambien	Landolphia, Ficus	faustgroße Bälle	braun bis schwarz
Massai Niggers	Sierra Leona	„ „	bis Kindskopf große Bälle	rötlich weiß bis braun
Gabun balls	Franz. Kongo	„ „	kleine und große Bälle	grau bis schwarz
Kassai, rot	Kongostaat	„ „	kleine zopfartig aneinander geklebte Kugeln	rostrot
„ schwarz			ballige Stücke und Streifen	schwarz
Ober-Kongo (Equateur)	„	„ „	in Ballen zusammengeklebte Kugeln	braun bis schwarz
Aruwimi	„	„ „	Kugeln bis zu 5 kg	weiß bis braun
Kamerun	Kamerun	Landolphia, Kickxia	kleine bis große Ballen	schwarz
Loande Thimbles	Angola	„ „	Fingerhüte und Würfel	Schiefergrau
Mozambique	Mozambique	Landolphia Vahea	kleine aneinander gepreßte Bälle oder Spindeln	schwarz, braun und rötlich
Assam	Bengalen, Bramaputra	Ficus	Klumpen bis 150 g, sehr klebrig	braun mit weißen Stellen
Ceylon	Ceylon	Manihot	unregelmäßige Würfel, etwa 10 cm	hellbraun bis schwarz

Digitized by Google

Tabelle 3. Gesamtgummierzeugung und Weltverbrauch von 1901 bis 1922 in Tons (aus India Rubber World.)

	Pflanzungs-gummi	Wildgummi	Zusammen	Welt-verbrauch
1901	5	54 895	54 900	50 400
1902	10	52 290	52 300	51 000
1903	20	55 880	55 900	56 800
1904	40	62 060	62 100	60 200
1905	150	61 950	62 100	65 100
1906	500	65 700	66 200	68 100
1907	1 000	68 000	69 000	62 400
1908	1 800	63 600	65 400	71 100
1909	3 600	66 000	69 600	70 200
1910	8 200	62 300	70 500	71 000
1911	14 400	60 700	75 100	74 400
1912	28 500	70 400	98 900	99 000
1913	47 600	60 800	108 400	99 800
1914	71 500	48 900	120 400	114 000
1915	108 000	50 700	158 700	158 000
1916	153 000	49 000	202 000	178 000
1917	213 000	53 000	266 000	210 000
1918	240 000	40 000	280 000	240 000
1919	300 000	40 000	340 000	230 000
1920	330 000	38 000	368 000	290 000
1921	270 000	23 000	293 000	292 000
1922	374 000	25 000	399 000	403 000

Beim Versand kommt durch die Verpackung und den Transport leider wieder Schmutz in den bereits in den Plantagen gewaschenen Gummi hinein, so daß derselbe, ebenso wie jeder Wildkautschuk, beim Verbraucher für die Zwecke elektrischer Isolation von neuem gewaschen werden muß. Dieses Waschen geschieht auf Waschmaschinen (Abb. 6); diese haben horizontale, nebeneinander angeordnete Walzen von etwa 600 mm Länge und 400 mm Durchmesser, von denen die eine 8, die andere 6 Touren pro Minute macht, wodurch ein Durchkneten des Gummis eintritt. Der Gummi wird vor dem Walzen in großen Bottichen in heißem Wasser angewärmt und dadurch erweicht; während des Walzens spült dauernd heißes Wasser über den Gummi und wäscht die Unreinigkeiten fort.

Das Trocknen des Gummis kann in Trockenkammern in erwärmter Luft oder in Trockenapparaten, die mit Luftzirkulation nach dem Gegenstromsystem versehen sind, oder in Vakuumschränken geschehen.

Der Gummi ist nun zum Gebrauch fertig, kann durch Wärme plastisch gemacht werden und könnte zu verschiedenen Artikeln geformt werden. Diese würden jedoch in der Wärme zerfließen und in der Kälte brüchig werden. Durch einen Zufall gelang es dem Amerikaner Goodyear, geboren am 29. Dezember 1800, der sich mit

Digitized by Google

der Herstellung von mit Gummilösung gestrichenen wasserdichten Stoffen beschäftigte, dem Gummi die plastischen Eigenschaften zu nehmen und ihn elastisch zu machen. Er wollte das Klebrigwerden vermeiden und versuchte, alle möglichen Stoffe als Trockenmittel beizumischen, unter anderem auch Schwefel. Ein derartiges Gemisch bestand aus Kautschuk, Schwefel und Bleiweiß; als Lösungsmittel diente Terpentin. Nach dem Aufstreichen auf den Stoff hängte er diesen nahe einem Ofen zum Trocknen auf. Zufällig kam ein Streifen mit dem heißen Ofen in Berührung und wurde schwarz; Goodyear wollte diesen abreißen, doch fiel ihm die eigentümliche Veränderung und

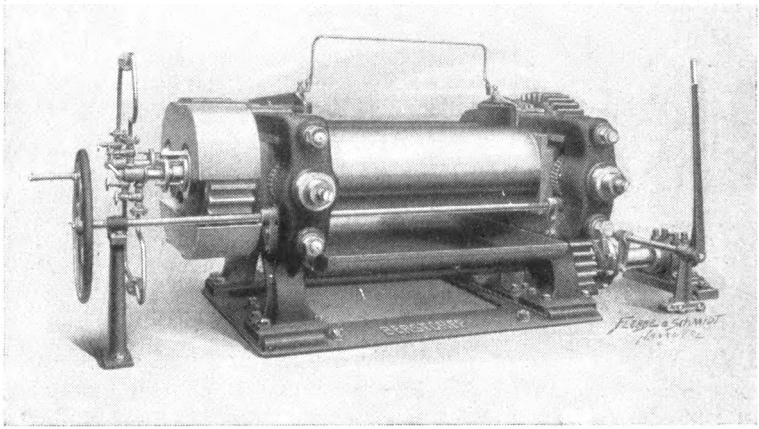


Abb. 6. Waschwalze (ähnlich auch Mischwalze).

Dehnbarkeit auf, er prüfte diesen Teil sorgfältig und fand ihn „völlig verändert". Diese Umwandlung wurde später von Broekedon als Vulkanisation bezeichnet.

Erst durch diese Erfindung wurde die allgemeine Verwendung des Gummis möglich; denn durch die Vulkanisation verliert der Gummi seine Knetbarkeit und erhält seine Elastizität. Je nachdem man dem Gummi nun mehr oder weniger Schwefel zusetzt wird das Endprodukt härter oder weniger hart. Um Weichgummi zu erhalten setzt man 5 bis 10%, um Hartgummi zu machen 25 bis 50% Schwefel zu. Außer dem Zusatz an Schwefel gibt man dem Gummi noch eine Reihe anderer Zusätze, um ihm die dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßten Eigenschaften und Farbe zu geben. Diese Zusätze sind vornehmlich anorganischer Natur, wie Kreide, Schwerspat, Metalloxyde, Erdfarben, aber auch Öle und Ölprodukte sowie Naturbitumen, Teer und Pech werden zugesetzt.

Digitized by Google

Das Mischen geschieht auf Mischwalzen, die sehr ähnlich den Waschwalzen gebaut sind, jedoch mit Walzen von etwa 1 bis 1,5 m Länge und 400 bis 500 mm Durchmesser.

Nachdem der vorher getrocknete Gummi eine gewisse Zeit durch die geheizten Walzen gelaufen ist und dadurch plastisch wurde, gibt man die Füllstoffe auf die Walze, der Gummi nimmt diese Füllstoffe nach und nach auf und nach Verlauf einer Zeit, die zwischen 20 Minuten und $1^1/_2$ Stunden liegt, ist eine vollständig homogene Masse entstanden. Diese Mischung muß einige Tage auslagern und wird dann auf Ka-

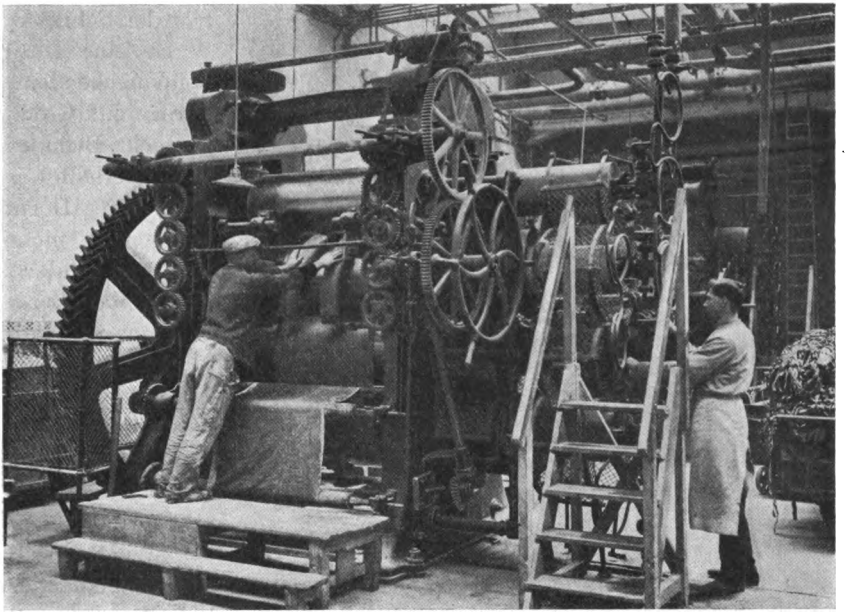


Abb. 7. Vierwalzenkalander.

landern (Abb. 7), das sind Maschinen mit zwei, drei oder vier übereinanderliegenden Walzen, zu dünnen Tüchern ausgewalzt. Da der Gummi zusammen kleben würde, läuft er nach seinem Durchgang durch die Walzen in sogenannte Mitläufertücher ein, in welchen er wiederum einige Tage lagern muß, um auszukühlen.

Gleichgültig, welches Endprodukt erzeugt werden soll, wird von diesem kalandrierten Gummi ausgegangen. Für die Isolation von Drähten und Kabeln kalandriert man den Gummi auf 0,3 bis 0,8 mm Stärke; nach dem Erkalten und Einpudern seiner Oberfläche mit Talkum, das beim Auswickeln aus dem Mitläufertuch geschieht, um das Zusammenkleben zu verhindern, schneidet man den Gummi in Streifen,

Digitized by Google

die um die Kupferadern der Leitungen in geeigneter Weise mit Spezialmaschinen herum gepreßt oder herum gewickelt werden. Sollen die Adern mit einem nahtlosen Schlauch umspritzt werden oder will man Weichgummischläuche oder Hartgummistangen bzw. -rohre herstellen oder auch dickere Platten aus Weich- und Hartgummi, so wird der Gummi 1,5 bis 3 mm dick kalandriert.

Zum Spritzen von Schläuchen oder Stäben bedient man sich der Spritzmaschinen (Abb. 8). In dem mit Dampf geheitzten Körper dreh sich eine Transportschnecke; das Material wird durch die Wärme plastisch und mittels der Schnecke durch eine Düse entsprechender Form und Größe gedrückt. Befindet sich innerhalb der Düse ein Dorn, so entsteht nicht ein Stab, sondern ein Schlauch. Beim Isolieren von Leitungsdrähten läuft der Draht zentrisch durch die Düse.

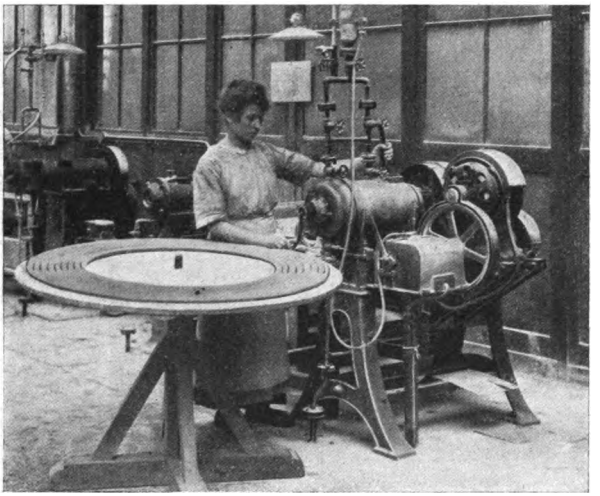


Abb. 8. Spritzmaschine.

Die Herstellung von dickeren Platten geschieht in der Weise, daß man mehrere kalandrierte Platten in geeigneter Weise übereinander klebt, doubliert, wie der Fachausdruck lautet. Bei Weichgummi kann man bei diesem Doublieren auch Stoffeinlagen hinein geben oder auch außen Stoffauflagen aufkleben. Diese Stoffeinlagen sind vorher auf Streichmaschinen mit in Benzin oder Benzol gelöstem Gummi gestrichen.

Das Vulkanisieren der Weichgummiwaren geschieht entweder in Vulkanisierkesseln (Abb. 9) oder unter heizbaren Pressen. Die Weichgummiplatten werden auf eine Trommel gewickelt und von außen mit umgewickeltem Stoff gehalten. Andere Teile werden in flachen Blechkästen in den Kessel gegeben, und zwar, damit sie beim Erwärmen nicht zusammenkleben, in Talkum gebettet. Der Deckel des Kessels wird nach dem Beschicken mittels Schrauben fest verschlossen und dann der Kessel mit Dampf von 3,5 bis 5 Atm. 20 bis 60 Minuten, je nach Art der Mischungen, geheizt. Formstücke, z. B. Pfropfen,

Digitized by Google

Dichtungen usw. werden in Stahlformen in heizbaren Pressen abgepreßt und bleiben dann eine gewisse Zeit unter Druck, bis die Vulkanisation vollendet ist, stehen.

Der dünne Grat, welcher sich herausgepreßt hat, wird nachträglich mit der Schere beschnitten oder abgestanzt.

Die größte Bedeutung als Isolationsmaterial hat der Weichgummi als Hülle für Leitungsdrähte. Kupferdrähte müssen feuerverzinnt sein,

Abb. 9. Vulkanisierkessel.

weil sich bei blanken Drähten durch den in der Gummimischung enthaltenen Schwefel Schwefelkupfer bildet und der Leiter zerstört wird.

Für die Gummiadern sind die Isolationsbedingungen fast in allen Ländern verschieden, so wird z. B. verlangt ein Isolationswiderstand bis zu 12000 Megohm pro km nach einer Wässerung von bestimmter Dauer. Um derartig schwere Bedingungen erfüllen zu können, muß man auf den Leiter erst eine entsprechend dicke Lage von reinem unvulkanisiertem Paragummi legen, bevor man die Decke aus Mischgummi herumlegt oder herumspritzt.

In Deutschland ist für Starkstromdrähte, sogenannte NGA-Leitungen, vorgeschrieben, daß der Kautschukgehalt $33\,^1/_3\,\%$ betragen muß und

Digitized by Google

daß die Adern nach 24stündiger Wässerung 2000 Volt Spannung eine halbe Stunde aushalten müssen. Die Messung wird dergestalt vorgenommen, daß die gummiumpreßten Drahtringe so in Wasserbassins eingelegt werden, daß die beiden Enden frei herausragen. Die Prüfspannung wird dann an das eine Ende der Leitung und an die innere Metallbekleidung des Bassins angeschlossen.

In besonderen Fällen, speziell bei Hochspannungskabeln, ist es notwendig, die elektrische Prüfung noch weiter auszudehnen; im allgemeinen genügt aber die Feststellung der vier elektrischen Fundamente für Kabel, nämlich

Durchschlagsfestigkeit,
Isolationswiderstand,
Dielektrische Verluste,
Kapazität.

Die Messung des Isolationswiderstandes wird in gleicher Weise vorgenommen, wie die Prüfung der Durchschlagsfestigkeit.

Die dielektrischen Verluste ergeben dauernde Energieverluste auch bei unbelasteten Kabeln; die Kapazität verursacht Ladeströme, die gleichfalls aus wirtschaftlichen Gründen klein gehalten werden müssen; dementsprechend müssen die Gummimischungen zusammengesetzt werden.

Augenblicklich ist das Materialprüfamt damit beschäftigt, neue Normen und Prüfmethoden für die normalen Gummiadern festzustellen.

Bei dieser Gelegenheit sei kurz auf die Prüfung von Weichgummi auf Elastizität und Zerreißfestigkeit hingewiesen. Diese mechanische Prüfung geschieht meist mit dem Zerreißapparat von Schopper-Dahlén. Es werden zur Prüfung mittels Spezialschneideapparats normale Ringe von 44 mm inneren und 52 mm äußeren Durchmesser aus Platten von genau 6 mm Stärke geschnitten. Die Ringe werden dann am Apparat über zwei Rollen gelegt und wird die untere Rolle durch Wasserdruck langsam von der oberen entfernt, wobei die untere Rolle, die mit Zahnbetrieb versehen ist und an einer Zahnstange entlang gleitet, sich langsam dreht. Dadurch wird der zu prüfende Gummiring an allen Punkten seiner Länge beansprucht. Im Moment des Durchreißens kann man die Zerreißfestigkeit in kg/cm² und die Dehnung in Prozenten direkt ablesen. Die Gütezahl, gleich dem Produkt aus beiden Zahlen, kann als Kriterium des Weichgummimaterials dienen. Reinpara mit 10% Schwefel gemischt und 50 Minuten bei 3,5 Atm. Dampfdruck vulkanisiert, hat eine Festigkeit von 96 kg/cm² und eine Bruchdehnung von 780%, die Gütezahl beträgt demnach rund 75000.

Die $33^1/_3$%ige Normalmischung für Gummiadern hat eine Festigkeit von 34 kg/cm² und eine Dehnung von 305%, also eine Gütezahl von rund 10400.

Digitized by Google

Festigkeit und Dehnung spielen bei Kabelgummi nur eine bedingte Rolle, insofern als bei starken Knicken der Leitungen das Gummimaterial nachgeben muß, ohne Risse zu bekommen.

Zur Erhaltung der Eigenschaften des Gummis werden die Adern mit einer Umspinnung von gummiertem Band versehen und mit diesem Band vulkanisiert, so daß der Gummi fest auf dem Leiter haftet. In der Regel erhalten die Adern noch eine Baumwollumklöpplung, die imprägniert wird, um die Baumwolle selbst vor frühzeitiger Zerstörung zu schützen.

In besonderen Fällen wird auf dem Kupferleiter eine Umspinnung mit vulkanisiertem sogenanntem Paraband vorgenommen. Diese Bänder von 0,15 bis 0,4 mm Stärke sollen aus reinem Para ohne jeden Zusatz auf dem Kalander gezogen werden. Nach dem Erkalten werden dann die Tücher aus den Mitläufern ausgewickelt und kalt vulkanisiert. Diese Kaltvulkanisation kann auf zweierlei Weise bewirkt werden; entweder bringt man die Ware auf kurze Zeit in eine Lösung von Chlorschwefel oder bringt sie mit Chlorschwefeldämpfen in Berührung. Chlorschwefel ist ein sehr gesundheitsschädlicher Stoff und es kann daher die Kaltvulkanisation nur in gut abgeschlossenen Apparaturen geschehen. Als Lösung für den Chlorschwefel verwendet man Schwefelkohlenstoff oder Benzin oder ein Gemisch von beiden. Die Ware wird in die Chlorschwefellösung getaucht und je nach der Dicke der Platten einige Sekunden bis einige Minuten darin gelassen, darauf in Wasser gut ausgewaschen und an der Luft getrocknet. Auch die in Chlorschwefeldämpfen aufgehängten Waren müssen nach dem Vulkanisieren in Wasser sorgfältig gewaschen werden, um ein Nachvulkanisieren zu vermeiden. Nach dem Trocknen werden die Tücher aufgerollt und in Streifen von 20 bis 40 mm Breite geschnitten und dann in geeigneten Maschinen auf den Leitungsdraht gesponnen.

Was die Haltbarkeit von Weichkautschukwaren betrifft, so ist diese begrenzt durch die allmählich eintretende Oxydation, die sich nach einer Reihe von Monaten oder Jahren, je nach der Qualität, ganz deutlich erkennbar einstellt. Heißvulkanisierte Weichgummiwaren werden durch die Oxydation an der Oberfläche zunächst klebrig; die klebrige Schicht aber verwandelt sich allmählich zu einer harten, spröden Kruste. Kaltvulkanisierte Weichgummiware verdirbt meist durch Nachvulkanisation, aber auch durch Oxydation, und es wird, da die Kaltvulkanisation nur für schwachwandige Gegenstände angewendet wird, die Ware durchweg brüchig.

Es empfiehlt sich, alle warmvulkanisierte Weichgummiwaren möglichst kühl, dunkel und feucht aufzubewahren, kaltvulkanisierte Waren dagegen in dunklen, kühlen aber gutgelüfteten Räumen; damit die sich stets abspaltende Salzsäure möglichst kräftig entfernt wird.

Digitized by Google

Grundbedingung für eine lange Lebensdauer aller Weichgummiwaren ist die Wahl der für den jeweiligen Zweck richtigen Gummisorten, der Zusammensetzung der Mischung und vor allem die richtige Vulkanisation.

Ich möchte an dieser Stelle noch auf Gummiisolierbänder und Gummiisolierrohre zu sprechen kommen. Unter Isolierbändern versteht man im allgemeinen Baumwollstoffe, die in langen Bahnen in einer Breite von etwa 800 mm auf Streichmaschinen mit Gummilösung einseitig oder doppelseitig gestrichen werden. Nach dem Streichen wird der Stoff wiederum zu einer Rolle aufgewickelt und diese in Scheiben von 10 bis 40 mm Breite geschnitten.

Die Gummilösung hat, besonders bei billigen Bändern mit Gummi nur insoweit noch etwas zu tun, als alle möglichen Abfälle von vulkanisiertem Gummi durch Aufkochen in Öl aufgefrischt und mit anorganischen und organischen Zusätzen gehörig vermischt werden. In einem Rührwerk wird unter Zusatz von Benzin oder Benzol die Auflösung der Masse vorgenommen, bis sie sirupartig streichfertig ist. Bei besseren Isolierbändern wird natürlich auch Rohgummi zugesetzt. Die Hauptsache ist, daß das Isolierband auch bei längerem Lagern klebrig bleibt und nicht hart wird. Auf bestimmte Isolationswerte legt man bei uns in Deutschland wenig Wert, es genügt meistens, daß das Band Isolierband heißt und so aussieht. Einige Behörden schreiben eine bestimmte Reißfestigkeit und Klebfähigkeit nach mehrtägiger Lagerung in einem — z. B. 60° C — heißen Raum vor. Es gibt aber andere Länder auf der Erde, die dem Lieferanten manche harte Nuß bei Isolierbändern zu knacken aufgegeben, sei es, daß sie Spannungswerte, sei es, daß sie Isolationswiderstände verlangen.

Isolierbänder werden nicht vulkanisiert, weil sie ja klebrig bleiben sollen.

Weiter komme ich auf die Isolierrohre zu sprechen, trotzdem es besser wäre, hierüber Stillschweigen zu bewahren. Ob der Gummi ℳ 120.—, oder ℳ 20.— kostet, das Isolierrohr kostet immer annähernd gleich viel, und zwar sehr wenig. Es mag daraus gefolgert werden, daß in dieser Mischung kein Gummi enthalten ist. Das stimmt! Wenigstens kein Rohgummi. In seiner Gummiküche ist der Gummifabrikant in der Lage, alle möglichen Abfälle von Altgummi durch Aufkochen mit Ölen usw. so umzuarbeiten, daß sie wieder plastisch werden, sogar noch eine Menge von Kreide und anderen anorganischen Substanzen aufnehmen, so daß eine solche Mischung sich gerade noch auf der Schlauchmaschine zu einem Rohr verarbeiten, daß es sich gerade noch vulkanisieren und gerade noch verbrauchen läßt. Wenn man bedenkt, daß diese Rohre nun noch hart, mittelhart und weich wie Gasschlauch verlangt werden, daß sie nicht brechen und sich bei

Digitized by Google

Biegungen nicht flach drücken sollen, so ist doch alles mögliche getan, um alte Abfälle, die sonst jedermann achtlos beiseite wirft, zu ihrem Recht kommen zu lassen. Dafür wird allerdings bei diesen Isolierrohren weniger auf Isolierfähigkeit gegeben, trotzdem gerade diese noch ihre starke Seite ist. Denn die 1,5 bis 2 mm Wand, die sie haben, verträgt schon 1000 bis 2000 Volt Spannung. Aber es ist ja bekannt, daß diese Rohre trotz ihres schönen Namens weniger Isolierzwecken dienen, als der Möglichkeit, bereits isolierte Leitungen auswechselbar unter Putz zu betten.

Von mittelhartem Isolierrohr zum Hartgummi, auch Ebonit genannt, ist nur ein Schritt. Es war oben schon erwähnt, daß der Unterschied zwischen Hartgummi und Weichgummi vornehmlich im größeren Gehalt an Schwefel zu suchen ist. Der beste Hartgummi, der überhaupt herstellbar ist, besteht aus 75% bestem Paragummi und 25% Schwefel. Diese Mischung ergibt bei richtiger Vulkanisation ein Material, das sich in Stabform von 4 mm Durchmesser zu einer engen Schlinge von etwa 50 mm Durchmesser biegen läßt, ohne daß der Stab bricht; beim Loslassen streckt sich das Material wieder vollkommen zum glatten Stabe.

Je nach dem Verwendungszweck und nach dem anzulegenden Preis werden dem Rohgummi Füllstoffe zugesetzt. Diese Füllstoffe bestehen hauptsächlich aus zu feinem Staub gemahlenen Hartgummiabfall, aus regenerierten, das heißt wieder plastisch gemachten Weichgummiabfällen, Öl und mit Schwefel gekochtem Öl, sogenannten Faktis.

Man unterscheidet beim Hartgummi die Plattenfabrikation, die Stab- und Rohrfabrikation und die Herstellung von Formstücken.

Zuerst zur Plattenfabrikation. Von der kalandrierten Gummirolle wird die Plattengröße abgeschnitten und mit einer schweren Handwalze auf geheiztem Tisch auf eine Zinnfolie fest aufgedrückt. Bei Plattenstärken bis zu 2 mm wird in derselben Weise eine Zinnfolie oben aufgedrückt. Bei stärkeren Platten müssen erst soviele 1,5 bis 2 mm starke Gummilagen aufeinander doubliert werden, bis die gewünschte Stärke herauskommt. Jede Lage für sich wird mit einem Lösungsmittel sauber gereinigt und dann so vorsichtig auf die untere aufgedrückt, daß sich keinerlei Luftblasen bilden können. Auch die beiden Zinnfolien müssen fest auf dem Gummi haften, damit später bei der Vulkanisation kein Wasser sich irgendwo eindrängen kann. Hieraus folgt, daß die Vulkanisation in Wasser geschieht, weil es hierbei möglich ist, die Temperatur langsamer ansteigen zu lassen, als es bei Dampf geschehen kann und weil hierdurch ein gleichmäßigeres Fabrikat erzielt wird. In dem Vulkanisierkessel befindet sich ein eiserner Kasten, in den die rohen Platten eingelegt werden, und der dann mit Wasser angefüllt wird. Nachdem der Kessel ge-

Digitized by Google

schlossen ist, läßt man Dampf hinein und den Dampfdruck ganz langsam auf 3 bis 5 Atm. steigen. Die Vulkanisation dauert je nach Qualität 4 bis 12 Stunden. Nach der Beendigung der Vulkanisation werden die Platten von Zinn befreit, indem man an einer Ecke das Zinn abhebt und es mittels eines Stabes abrollt, wie den Deckel einer Sardinenbüchse. Die Platten werden nun in einer geheizten hydraulischen Presse gerade gerichtet und in Salzsäure gebeizt, d. h. von der dünnen Zinnglanzschicht befreit.

Die Hartgummi-Stab- und -Rohrfabrikation verwendet die gleichen Spritzmaschinen wie für Weichgummi (Abb. 8). Die Stäbe bzw. Rohre werden beim Austreten aus der Spritzmaschine in meterlange Stücke geschnitten, die Rohre auf dem Innendurchmesser angepaßte Dorne gesteckt und in Talkum gelagert vulkanisiert. Nach dem Vulkanisieren können die Stäbe und Rohre in Spezialmaschinen genau auf Maß geschliffen und poliert werden.

Die Herstellung von Formstücken geschieht in Stahlformen oder in Hartbleiformen. Die letzteren werden über Normalmodelle gegossen und auf der Unterfläche glatt gefräst. Falls das Preßstück Löcher bekommen soll, müssen entsprechende Stahl- oder Bleikerne eingelegt werden.

Das Gummimaterial wird, wie schon oben bemerkt, ebenfalls erst kalandriert und wenn nötig doubliert oder gespritzt. Die vorbereiteten Mischgummistücke werden, ebenso wie die Formen, auf Wärmplatten, die gleichzeitig als Arbeitstische dienen, vorgewärmt; dadurch wird das Material vollständig weich und plastisch und läßt sich leicht in die Form hineindrücken; die zweite Formhälfte wird darüber gedeckt und die Form unter einer kleinen Hand- oder hydraulischen Presse zusammengedrückt.

3 bis 5 Formen werden mittels Spannbügel zusammengeschraubt und kommen in den Vulkanisierkessel. Die Teile werden nun $3^1/_2$ bis 4 Stunden bei 138 bis 150° entsprechend 3,5 bis 5 Atm. vulkanisiert. Bei bestimmter Zusammensetzung der Mischung ist es möglich, nur eine halbe Stunde zu vulkanisieren und die so vorvulkanisierten Teile aus der Form herauszunehmen. Dies Verfahren hat den Vorteil, daß man die Form schneller wieder für die nächste Pressung nutzbar machen kann. Derartige Teile sind noch nicht hart; sie werden jetzt entgratet und dann ohne Form in besonderen doppelwandigen Vulkanisierkesseln, deren Innenraum mit sauerstoffarmer Luft gefüllt ist, während 8 bis 9 Stunden nochmals vulkanisiert, wodurch das Stück vollkommen hart wird. Durch Drehen, Schleifen und Polieren erlangt dann der Preßling seine fertige Gestalt.

Wenn nun in die Formstücke Metallteile eingepreßt werden sollen, so läßt sich dies leicht bewirken, sobald es möglich ist, dieselben so

Digitized by Google

zu fassen und festzulegen, daß sie sich beim Abpressen nicht verdrehen, verschieben oder wegdrücken können. Diesem Umstand müssen die Konstrukteure besonders Rechnung tragen. Auch soll bei den Metallteilen, je nachdem sie auf Zug, Drehung oder sonstwie beansprucht werden, überlegt werden, ob der einzubettende Teil rund oder kantig sein oder mit Einfräsungen, Kerben, Kordierung, Längs- oder Querrillen versehen werden muß.

Es ist auch möglich, Metallteile unsichtbar für die Außenwelt einzubetten. Es bedarf dann einer besonderen Vorpreßform, in welche das Metallteil durch Rippen in richtiger Lage gehalten wird. In der Nachpreßform drücken sich dann die Nuten, die durch die erwähnten Rippen entstanden sind, zu.

Wie bereits erwähnt wurde, erhält der Hartgummi durch die Verschiedenartigkeit seiner Zusätze bestimmte Eigenschaften, und zwar kann man durch die Wahl der Zusätze z. B. die Wärmebeständigkeit des Hartgummi in gewissen Grenzen steigern; man kann den Hartgummi so einrichten, daß die überschlagenden Funken eines Induktors keine leitende Brücke auf der Oberfläche erzeugen; man kann ihn ferner so herstellen, daß er hart oder weniger hart, bis zur Lederhärte herunter, wird. Selbstverständlich sind von den Zusätzen auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften abhängig, aber auch der Preisunterschied spielt eine bedeutende Rolle.

Der bereits erwähnte beste Hartgummi aus 75% Paragummi und 25% Schwefel ist naturgemäß der teuerste. Ich übergehe die Zwischenstufen und erwähne, daß ein immerhin für viele Zwecke noch brauchbarer Hartgummi aus regenerierten Altgummi, mit Zusatz von feinstgemahlenem Hartgummistaub, Schwefel und einigen anderen Füllstoffen herstellbar ist, dessen Mischungspreis im Verhältnis zur erstgenannten Primaqualität wie 1 : 4 steht.

Vor einer ganzen Reihe von Jahren brachte die Firma Traun Söhne, Hamburg, eine Gummimischung auf den Markt, welche sie mit dem Namen „Eisengummi“ belegte und zwar nicht etwa, weil das Material hart wie Eisen war, sondern weil es eine besonders gute Bindung mit Eisen hatte. Im Laufe der Jahre ist dieses Material von allen Gummifabriken eingeführt worden und zwar in zwei Qualitäten, hart und lederhart. Die harte Qualität hat den Vorzug größerer Wärmebeständigkeit als Hartgummi, die lederharte Qualität den einer größeren mechanischen Festigkeit. Diese Qualität wird überall da angewendet, wo das Material auf Stoß oder Schlag stark beansprucht wird, z. B. für die Aufhängeteile der Straßenbahn-Oberleitung und für die Lichtkupplungsstöpsel der Straßenbahn, die auch dann nicht zerbrechen dürfen, wenn sie auf das Straßenpflaster fallen. Die Widerstandskraft des Ledergummis gegen Schlag ist derart groß, daß, wenn von einem

Digitized by Google

verpfuschten Bolzen das Isoliermaterial mit dem Hammer abgeschlagen werden soll, eher der Mann erlahmt oder der Hammer flöten geht, als daß das Material zerspringt. Es bleibt nur übrig, derartige Bolzen stark anzuwärmen und dann das Material unter der Presse abzuquetschen.

Das spezifische Gewicht des besten Hartgummis beträgt 1,15, das des minderwertigsten 1,4; bei Spezialqualitäten schwankt das spezifische Gewicht zwischen 1,3 und 2.

Die Isolationsfähigkeit von Hartgummi, selbst der geringwertigsten Sorten, ist wesentlich höher als die von gummifreien Preßmaterialien und es beträgt der Oberflächenwiderstand, gemessen auf einer Fläche von 100 $\times$ 10 mm mit 1000 Volt Gleichstrom, über 1 Million Megohm. Voraussetzung hierbei ist, daß die Oberfläche poliert oder wenigstens fein geschliffen ist. Beim Fehlen der Politur machen sich in der Oberflächenisolation feuchtes Wetter oder feuchte Räume unter Umständen sehr schnell und unangenehm bemerkbar. Der in jedem Gummi, besonders aber im Hartgummi vorhandene freie, d. h. durch die Vulkanisation nicht gebundene Schwefel bildet unter der Einwirkung des Sauerstoffs der Luft Schwefelsäure, so daß bei feuchtem Wetter die Oberfläche leitend werden muß. Aber auch polierte Stücke werden durch diese Schwefelsäurebildung, besonders unter dem Einfluß des Sonnenlichts, im Laufe der Zeit verändert; sie werden stumpf, gelblich und grün, wenn sie nicht von Zeit zu Zeit, am besten mit Petroleum, gereinigt werden. In allerletzter Zeit scheint es gelungen zu sein, lichtbeständigen Hartgummi herzustellen und es ist also Aussicht vorhanden, daß der große Mangel des Hartgummis, die Schwefelsäureabscheidung, sich vermeiden lassen wird.

Die Durchlagsspannung liegt je nach der Qualität zwischen 30 000 und 15 000 Volt pro mm.

Die Dielektrizitätskonstante des Hartgummi liegt zwischen 2 und 3. Zum Vergleich nenne ich Hartpapier 3,4 bis 4,5, Porzellan 4,4 bis 6, Rein-Bakelit 6 bis 8, Glas 3 bis 9.

Die Biegefestigkeit von Hartgummi schwankt je nach Qualität zwischen 1000 und 350 kg/cm², die Schlagfestigkeit zwischen 23 und 4,2 cmkg/cm².

Die Bearbeitungsfähigkeit von Hartgummi ist abhängig vom Aschegehalt des Materials. Je größer der Aschegehalt des Hartgummis ist, desto mehr werden die Bearbeitungswerkzeuge angegriffen. Der Aschegehalt der besten Qualität beträgt 0,4 % und der der minderwertigsten 18 % bis 20 %.

Hartgummi wäre ein ideales Isoliermaterial, wenn seine Wärmebeständigkeit größer und das Material feuersicher wäre. Leider ist die Wärmebeständigkeit, gemessen im Martens-Apparat nur 40 bis 55° C. Einige Spezialqualitäten lassen sich herstellen bis zu einer Wärmebeständigkeit von etwa 100°.

Digitized by Google

Hartgummi brennt mit stark rußender Flamme und unter dem Lichtbogen bildet sich eine leitende Brücke, die auch nach dem Erkalten leitet. Nur bei einer besonderen Abart des Hartgummis, dem Äternit der S.S.W. bzw. Stabilit der A.E.G. bzw. Isolast von Traun, leitet die Brücke nach dem Erkalten nicht. Dieses Material, dessen Wärmebeständigkeit etwa 85° beträgt, ist jedoch nur für einige Spezialzwecke brauchbar. So wird eine Abart dieses Materials für die Verteilerscheiben von Zündapparaten der Explosionsmotoren verwendet, bei denen es ganz besonders darauf ankommt, daß die Oberfläche isolierend bleibt, auch wenn, durch Staub, Feuchtigkeit und Schmutz eingeleitet, ein Überschlag des etwa 10 mm langen Funkens eintritt.

Die Bearbeitbarkeit dieses Materials ist schwierig, das Material ist nicht hochglanzpolierfähig.

Hartgummi ist nicht hygroskopisch. Die Wasseraufnahme, selbst nach achttägigem Wässern, beträgt nur einige Hundertstel Prozent. Reine Hartgummimaterialien sind beständig gegen Alkali, Säuren und Öl bei Zimmertemperatur, der erwähnte lederharte Eisengummi nicht gegen Säuren und Äternit-, Stabilit- usw. -sorten, nur gegen Öl.

Es wurde bereits erwähnt, daß dem Hartgummi gemahlene Abfälle zugesetzt werden. Das Mahlen der Abfälle geschieht auf kräftig gebauten Walzen, ähnlich den Mischwalzen. Die Hartgummiabfallstücke müssen nach Qualität sortiert werden und zwar hat guter Hartgummi einen mattglänzenden muscheligen Bruch; je glänzender der Bruch ist, um so geringwertiger ist der Hartgummi; Eisengummibruch sieht grau und stumpf aus. Das aus den Abfällen gewonnene feine Pulver wird zur Entfernung von Schmutz und Metall in Schlemmrinnen geschlemmt, getrocknet und mehrfach gesiebt und sieht dann aus wie Schokoladenpulver. Für die Herstellung von Formstücken, Stäben und Rohren ist der Zusatz von Hartgummistaub zu den Mischungen unbedingt erforderlich.

Ein Spezialhartgummimaterial ist das Gummiasbest, auch Asbestonit, Vulkanasbest usw. benannt. Jede Gummimenge nimmt auf der Mischwalze nur eine bestimmte Menge Mineralstoffe auf und das, was man dem Eisengummi, dem Äternit davon beigegeben hat, ist wohl das Maximum. Außerdem ist es unmöglich, lange Asbestfaser zur Erhöhung der Festigkeit dem Material beizugeben, weil die Mischwalzen die Fasern vollständig zerkleinern. Löst man aber den Rohkautschuk in Benzin auf, so kann man ihm viel mehr Füllstoffe, wie Asbestfaser, Asbestmehl, Kreide, Schwerspat und dergleichen zugeben. Das Mischen geschieht in einer Knetmaschine. Die schlammartige Masse wird auf Leinenunterlagen in einem Rahmen, je nach der gewünschten Stärke von Hand ausgestrichen, dann zur Zurückgewinnung des Benzins in einem Vakuumschrank getrocknet, sodann im Kalander auf richtige

Digitized by Google

Stärke gewalzt und zum Schluß unter der heizbaren Presse vulkanisiert. Da die Mischung nur etwa 10% Kautschuk enthält, im übrigen anorganische Füllstoffe, so ist naturgemäß die Hitzebeständigkeit dieses Materials sehr groß und liegt zwischen 120° und 180°. Unvulkanisiertes Material wird vielfach als Dichtung für Mannlochdeckel an Heißdampfkesseln benutzt; es vulkanisiert dann am Kessel selbst und bildet eine vorzügliche Dichtung, die allerdings beim Öffnen des Kessels zerreißt. Gummiasbest ist kaum entflammbar und brennt auch kaum weiter. Es ist also ein Zwischending zwischen dem im Vortrage des Herrn Dr. Bülteman erwähnten guten Preßmateralien und dem Hartgummi. Die Bearbeitung macht durch die vielen Füllstoffe und durch die Asbestfaser erhebliche Schwierigkeiten.

Die Biegefestigkeit beträgt 300 kg/cm². Die Schlagbiegfestigkeit 4,0 cmkg/cm², das spezifische Gewicht ist 2. Die Wasseraufnahmefähigkeit beträgt nach achttägigem Wässern 0,9 bis 1%. Die Oberflächenisolation beträgt 30 000 Megohm, die Durchschlagsfestigkeit ist etwa 2000 Volt pro mm. Das Material ist beständig gegen Alkali, Säuren und Öl bei Zimmertemperatur, es ist nicht lichtbogensicher.

So viele Feinde das Hartgummimaterial, hauptsächlich im Kreise der Starkstromtechniker hat, es wird wohl kaum je verdrängt werden, denn die guten Eigenschaften: die hohe Isolation und die Bildsamkeit und Schmiegsamkeit machen es für viele Zwecke unersetzbar.

Schon einigemal wurde die Verwendung von regeneriertem Altkautschuk erwähnt. Unter „Regenerieren" im weiteren Sinne versteht man das Wiederverwendbarmachen von vulkanisiertem Weichgummi, indem man demselben die Elastizität nimmt und ihn wieder plastisch macht. Die älteste und einfachste Methode, die auch bereits bei der Herstellung von Isolierrohr erwähnt wurde, besteht im Kochen von Gummiabfällen, die frei von Stoffeinlagen sein müssen, mit Öl. Das Öl wirkt hierbei als Lösemittel, wobei zu berücksichtigen ist, daß Kautschuk bei 200° C unter gleichzeitigem vollständigem Zerfall vollkommen verflüssigt wird, der vulkanisierte Kautschuk in heißem Öl — 120 bis 130° C — eine starke Quellung erleidet und in koloidale Lösung geht. Als Regenerierung im engeren Sinne kann diese Methode aber nicht angesehen werden.

Man unterscheidet im allgemeinen vier Arten der Regeneration:

das Säureverfahren,
das Alkaliverfahren,
das Lösungsverfahren,
das mechanische Verfahren.

Bei allen Verfahren kommt es neben dem Wiederplastischmachen und der Entfernung des freien Schwefels — der an Kautschuk gebundene Schwefel kann nach keinem bis jetzt bekannten Verfahren entfernt

Digitized by Google

werden — vor allem darauf an, die bei den in großen Mengen anfallenden alten Weichgummiabfällen vorhandenen Gewebeeinlagen von dem Kautschuk zu scheiden.

Bei dem Säure- und Alkaliverfahren wird das Gewebe durch chemische Einwirkung zerstört und in wasserlösliche Form, in Hydrozellulose oder deren Salze übergeführt, die Kautschukmasse einschließlich des größten Teils der Füllstoffe bleibt ungelöst zurück.

Beim Lösungsverfahren wird der Kautschuk durch Behandlung mit entsprechenden Lösemitteln bei größeren Wärmegraden gelöst, die ungelösten Füllstoffe und die Gewebe bleiben zurück und können die letzteren noch nutzbar gemacht werden.

Das mechanische Verfahren, das besonders während des Krieges eine größere Bedeutung erlangt hat, ist keine Regenerierung in vorgenanntem Sinne. Es beruht darauf, daß die Abfälle — am besten solche ohne Stoffeinlagen — zu einem möglichst feinem Mehl gemahlen werden. Dieses Mehl wird dann auf möglichst heißen Walzen unter Zusatz von etwas Rohgummi plastiziert. Bei Abfällen mit Stoffeinlagen, z. B. Automobilreifen, wird das Mehl vor dem Plastizieren mittels eines Windsichters und mehrfacher Siebung von den Fasern der Stoffeinlagen möglichst befreit, doch bleiben immer noch 15 bis 20 % Fasern im Kautschukmehl, während an den 80 bis 85 % Fasern noch Kautschuk haftet. Für elektrotechnische Zwecke ist dieses Regenerat nicht geeignet.

Beim Säureverfahren nach dem Amerikaner Mitchel werden die grob gemahlenen Abfälle mit verdünnter Schwefelsäure längere Zeit gekocht, wobei die Fasern zerstört und der Kautschuk etwas plastiziert wird. Nach einem Nachwaschen mit Sodalösung, um die Säure zu neutralisieren, und sorgfältigem Waschen auf der Waschwalze findet meist noch eine Nachbehandlung mit hochgespanntem Dampf oder ein Kochen mit Sodalauge im Autoklaven bis 150° C statt, wodurch eine genügende Plastizität erzielt wird. Gründliches Auswaschen auf der Waschwalze, nachträgliches Trocknen im Vakuum oder im Heißluftapparat und Auswalzen auf heißer Mischwalze ergeben dann das fertige Regenerat in Platten.

Bei dem Alkaliverfahren, das von dem Engländer Marx angegeben wurde, werden die zerkleinerten faserhaltigen Abfälle im Autoklaven bei 140 bis 175° mit 10 % Alkalilauge während mehrerer Stunden gekocht. Mit der vollständigen Zerstörung der Faserstoffe findet hierbei eine gute Plastizierung der Kautschukmasse statt. Auch bei diesem Verfahren muß das erwähnte gründliche Waschen, Trocknen und Plastizieren auf der Walze zu Platten erfolgen.

Das Alkaliverfahren ist dem Säureverfahren insofern überlegen, als Säure stets einen zersetzenden Einfluß auf Kautschuk ausübt. Wenn

Digitized by Google

also die Säure nicht sorgfältig und vollständig aus dem Regenerat entfernt wird, leidet die Haltbarkeit der Regenerate, bzw. der damit hergestellten Waren ganz bedeutend. Spuren von Alkali üben im Gegensatz hierzu einen günstigen Einfluß aus.

Beim Lösungsverfahren bestanden zunächst Schwierigkeiten darin, daß zum Lösen des vulkanisierten Kautschuks in den bekannten Lösemitteln hohe Temperaturen erforderlich waren, wobei bereits eine Depolymerisation des Kautschuks eintrat, wodurch derselbe weich und klebrig wurde. Bei Anwendung geeigneter Lösemittel und Wahl der richtigen Temperatur ist es aber möglich, die Schwierigkeiten zu überwinden, und gute und durchaus brauchbare Regenerate zu erzeugen. Die Vorteile des Lösungsregenerats gegenüber den beiden vorgenannten sind:

1. völlige Metallfreiheit, da die Metalle ebensowenig wie die Fasern in Lösung gehen,
2. Rückgewinnung der Fasern, die zur Dachpappenfabrikation und anderem Verwendung finden können,
3. die Abscheidung ungelöster Füllstoffe ist möglich.

Die im Altgummi, z. B. Autoreifen, enthaltenen Metallteile von Kupfernieten, Messingscheiben werden zwar nach Möglichkeit ausgesucht, doch zeigen sich nach dem Mahlen immer noch Splitterchen, die aus dem Säure- oder Alkaliregenerat durch Filterpressen möglichst entfernt werden müssen, soll das Regenerat zu Isolationszwecken Verwendung finden.

Alle Gummiware aus Regenerat oder starker Beimischung von Regenerat, selbst des besten, hat eine geringere Lebensdauer als Ware aus Rohkautschuk. Da Deutschland aber für den Bezug von Rohkautschuk völlig vom Ausland abhängig ist, sollten im Interesse einer gesunden Volkswirtschaft nach Möglichkeit die im Lande vorhandenen Abfälle zu Regenerat und dieses zu solchen Gegenständen verarbeitet werden, bei denen es auf eine viele Jahre währende Lebensdauer nicht ankommt.

Während des Krieges machte sich der Mangel an Rohkautschuk immer mehr fühlbar und wenn auch alle Gummifabriken und Kabelwerke lernten, dem Regenerat die besten Seiten abzugewinnen, so war doch eine schwer empfundene Lücke in dem Materialbereich genannter Industrien vorhanden, zumal Heer und Marine ungeheure Mengen Gummiwaren, in Form von Drähten und Kabeln, Autobereifung und Gasmasken, Akkumulatorenkästen für U-Boote und vielem anderen mehr, brauchte. Da gelang es gerade zur rechten Zeit, den künstlichen Kautschuk in größeren Mengen fabrikmäßig herzustellen.

Bereits Ende des Jahres 1915 wurden die ersten Vereinbarungen seitens des Reichs auf Lieferung synthetischen Kautschuks, zunächst für Hartgummizwecke, mit den Farbenfabriken vorm. Friedr. Bayer & Co.

Digitized by Google

in Elberfeld abgeschlossen, denen bald weitere Aufträge auf künstlichen Kautschuk, der für Weichgummizwecke verwendbar war, soweit es nach dem damaligen Stand der Fabrikation möglich war, folgten. Die Farbenfabriken Bayer & Co. richteten eine neue Fabrik in Leverkusen zur Herstellung des nötigen Kautschukkohlenwasserstoffes ein, die nach und nach zu einer Jahresleistung von 2000 Tonnen künstlichen Kautschuks ausgebaut wurde.

War dieser auch noch nicht für alle Zwecke verwendbar, so wurde dadurch doch Naturkautschuk frei, der für andere Fabrikate ver wendet werden konnte.

Die fabrikationsmäßige Herstellung von synthetischem Kautschuk oder richtiger der Synthese kautschukähnlicher Stoffe, da es bisher nicht geglückt ist ein in seinen physikalischen Eigenschaften mit dem Rohkautschuk völlig übereinstimmendes Erzeugnis zu erzielen, gelang erst im Anfang des Krieges, trotzdem es Geheimrat Harries und fast gleichzeitig Fritz Hoffmann, einem Chemiker der Farbenfabriken Bayer & Co. schon 1909 gelungen war, im Laboratorium künstlichen Kautschuk herzustellen.

Es wurde oben schon darauf hingewiesen, daß Kautschuk sich bei Erhitzung auf mehr als 200° C unter gleichzeitigem Zerfall vollkommen verflüssigt. Das Produkt der trocknen Destillation ist ein leichtbewegliches Öl, das sogenannte Kautschuköl und ist ein je nach Art der Destillationsbedingungen schwankendes Gemisch von Kohlenwasserstoffen, die der Formel $(C_5H_8)_{12}$ entsprechen und vorwiegend terpenartige Verbindungen darstellen, die etwa 6% „Isopren" enthalten. Isopren wird als Muttersubstanz des Kautschuks angesehen.

C. P. Williams hat Isopren bereits 1860 aus dem Kautschuköl isoliert und 1875 gelang es, Isopren zu Terpenen und kautschukartigen Produkten zu polymerisieren. 1882 endlich gelang es Tilden, Isopren synthetisch aus Terpentinöl herzustellen.

Harries gelang es aus Isopren durch Anwendung von Essigsäure als Polymerisationsmittel Kautschuk zu gewinnen; Hoffmann gelangte durch Anwendung von Wärme zum gleichen Ziel.

Neben dem Isopren gelang es auf demselben Wege auch aus dem Homologen des Isopren, den Methylisopren Kautschuk herzustellen. Der hohe Preis des Terpentins verhinderte in wirtschaftlicher Hinsicht die fabrikatorische Herstellung und wurde daher diese aus dem Methylisopren aufgenommen und durchgeführt, zumal die benötigten Rohstoffe im Inland vorhanden waren und den Elberfelder Farbwerken reiche Erfahrungen aus der Vorkriegszeit zur Verfügung standen. Der daraus gewonnene Kautschuk wurde mit dem Namen „Methylkautschuk" bezeichnet.

Das zur Erzeugung des Methylisopren benötigte Azeton wurde aus

Digitized by Google

Kalziumkarbid durch Überführung des daraus erzeugten Azetylens in Essigsäure hergestellt. Der zweite benötigte Rohstoff ist das in Flitterform zur Reduktion des Azetons erforderliche Aluminium, das ebenfalls in Deutschland erzeugt wird.

Zunächst wurden zwei Sorten Methylkautschuk hergestellt und zwar H-Kautschuk speziell für Hartgummi und W-Kautschuk für Weichgummi; letzterer konnte aber erst in späterer Zeit in größeren Mengen hergestellt werden, daher mußte man auch für Weichgummiwaren zunächst mit H-Kautschuk arbeiten. Der Unterschied in den beiden Kautschuksorten, die aus demselben Kautschuk-Kohlenwasserstoff gewonnen wurde, entsteht durch die verschiedene Behandlung des Methylisoprens während der Polymerisation. Die Polymerisationszeit beträgt für H-Kautschuk etwa 3 Monate, für W-Kautschuk etwa 5 Monate. Der fertige H-Kautschuk bildet eine festzusammenhängende, schneeweiße Masse und muß mit Werkzeugen aus den Polymerisationsgefäßen maschinell entfernt werden. Der fertige W-Kautschuk ist ein helles, gallertartiges, zähes Produkt. Beide Sorten sind, da sie chemisch rein gewonnen werden, durch das Fehlen der Harze und Eiweißstoffe dem Verderben durch Oxydation viel mehr ausgesetzt als der natürliche Kautschuk. Den Farbwerken Bayer & Co. gelang es, Konservierungsmittel zu finden, die gleich nach dem Entnehmen des Kautschuks aus den Polymerisationsgefäßen während des Auswalzens zu Fellen zugemischt wurden. Trotzdem bräunt sich der Methylkautschuk bald, wenn er nicht unter Luftabschluß gehalten wird. Da der Methylkautschuk sehr träge vulkanisiert, mußte bei der Verarbeitung ein Vulkanisationsbeschleuniger, den Bayer & Co. als Vulkazit auf den Markt bringen, zugesetzt werden.

Während des Krieges wurde Methylkautschuk in jeder Form, teils mit teils ohne Zusatz von Naturkautschuk oder Regenerat verwendet und zwar zu

Hartgummi für Akkumulatorenkästen, Antennenisolatoren, Verteilerscheiben zu Zündapparaten für Flugzeug- und Automobilmotoren, Zahnkautschuk und anderes;

Weichgummi für Vollgummireifen und Autodecken für Kraftwagen und Flugzeuge sowie für Dichtungsrahmen;

Streichlösung für Ballonstoffe, Taucheranzüge, Gasmasken, Gummiasbestpackungen.

Eine Hartgummiplatte aus

100 Teilen H-Kautschuk, 50 Teilen Schwefel, 2,3 Teilen Vulkazit

hat ein vorzügliches Aussehen und ist durchscheinend.

Es wurde zum Vergleich eine solche aus

100 Teilen Para mit 50 Teilen Schwefel

hergestellt.

Digitized by Google

Die Biegefestigkeit war bei beiden etwa 950 kg/cm²;
„ Schlagbiegefestigkeit 19,5 cmkg/cm² bei Methylkautschuk,
30 „ „ Parakautschuk.
Wärmebeständigkeit und elektrische Eigenschaften können als gleich bezeichnet werden.

Beim Weichgummi stellten sich die Vergleichszahlen wie folgt dar:

	Zerreißfestigkeit	Bruchdehnung	demnach Gütezahl
	Paragummi im günstigsten Mischungsverhältnis:		
	96 kg/cm²	780%	75 000
	Methylkautschuk im günstigsten Mischungsverhältnis:		
H-Kautschuk	93 kg/cm²	332%	32 000
W-Kautschuk	60 kg/cm²	514%	30 000

Setzt man Paramischung bei günstigster Zusammensetzung und Vulkanisation auf 100 kg/cm² Festigkeit und 1000% Dehnung, so ist
H-Kautschuk etwa 80% der Festigkeit, 30—38% } der Dehnung des
W-Kautschuk „ 50—58% „ „ 60—75% } Parakautschuks.
Bei beiden Sorten sind aber die Zahlen für die Verwendung als Isolationsmaterial für Kabel und Drähte reichlich hoch und haben sich keinerlei Anstände während des Krieges gezeigt. Übrigens machen die Weichgummimischungen aus Methylkautschuk mehr einen lederähnlichen Eindruck, sind also nicht so elastisch wie Rohgummimischungen.

Die dielektrischen Verluste waren

bei 2000 Volt etwa um 13%
„ 4000 „ „ „ 10%
„ 5000 „ „ „ 5%

höher als die entsprechenden Werte von Naturkautschuk, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, daß sich Methylkautschuk nicht allein zu Kabelmischungen verarbeiten ließ; es mußte vielmehr Regenerat zugesetzt werden, so daß auch dieses an der Verschlechterung schuld tragen kann.

Die Durchschlagsfestigkeit von mit synthetischen Kautschuk hergestellten Kabelgummimischungen war die gleiche wie die von Rohgummimischungen, wie überhaupt die Ähnlichkeit des künstlichen Kautschuks mit dem natürlichen in elektrischer Beziehung in weit höherem Maße zum Ausdruck kommt als beim Vergleich der mechanischen Eigenschaften.

Der Preis des Methylkautschuks ist nun aber leider ein so hoher, daß bei den vorher erwähnten billigen Rohgummipreisen eine Konkurrenz ausgeschlossen ist. Kostete doch während des Krieges Methylkautschuk etwa ℳ 40.00 und Para etwa ℳ 35.00. Bei den jetzt so sehr gestiegenen Arbeitslöhnen und Unkosten dürfte sich der Preis des Methylkautschuks noch höher stellen. Die Farbwerke Bayer & Co. haben dem auch Rechnung getragen und die Fabrikation eingestellt. Aber schon die Tatsache, daß es möglich ist, die Produktion des künstlichen Kautschuks mit einheimischen Rohstoffen auszuführen,

Digitized by Google

läßt es wünschenswert erscheinen, die Arbeiten auf diesem Gebiet nicht ruhen zu lassen[1]).

Dem Kautschuk sehr ähnlich und im Anfang seines Bekanntwerdens sehr oft mit ihm verwechselt ist die Guttapercha. Die Guttaperchagewächse gedeihen nur zwischen dem 5. Grad nördlicher und dem 3. Grad südlicher Breite, hauptsächlich auf den Malaischen Inseln, auf Sumatra, Borneo, Java und Neuguinea; sie gehören zur Familie der Sapotaceen. In Tabelle 4 sind die hauptsächlichsten Pflanzen und die bekanntesten Handelsmarken angegeben.

Tabelle 4. Guttaperchapflanzen.

Familie	Art	Vorkommen
Sapotaceen	Dichopsis oder Isonandra oder Palaquium } Gutta	Malacca, Singapor
	„ oblongifolium	Sumatra, Malacca, Borneo
	„ pistulatum	Ceylon
	Payena Lerii	Sumatra, Malacca, Borneo
	Bassia Parkii	Borneo, Ober-Guinea.

Guttaperchasorten.

1. Pahany,	5. Bolungan,	9. Siak,
2. Sarawak,	6. Pontianak,	10. Sarpang,
3. Landarkan,	7. Penang,	11. Maragulai,
4. Banjersoh,	8. Banjermasin,	12. Djambi.

Um den Latex zu gewinnen, wird leider noch heute fast überall Raubbau getrieben, indem die Bäume gefällt werden; nur an wenigen Stellen ist man zu einer rationelleren Anzapfung der Bäume übergegangen. Der Guttaperchasaft befindet sich nicht nur wie der Gummilatex unter der Rinde, sondern auch in den Blättern und Zweigen.

Das Verfahren des malaischen Sammlers besteht stets darin den Baum zu fällen, die Zweige abzutrennen und den ganzen Stamm entlang die Rinde in Abständen von 30 bis 45 cm ringförmig zu durchschneiden. Der milchige Saft füllt bald die in die Rinde eingeschnittenen Kerbe aus und gerinnt sehr rasch, worauf er abgekratzt und gesammelt wird. Bei minderwertigen Arten braucht der Saft längere Zeit zum Gerinnen und wird in Behältern, die unter den Stamm gestellt werden, gesammelt. Der Saft wird dann in den Hütten der Neger unter Zusatz von Wasser langsam gekocht, wodurch das Gerinnen der Guttapercha eintritt.

Die Blätter und dünneren Zweige werden ebenfalls zerhackt und gekocht.

[1]) Die Unterlagen für diesen Teil, den künstlichen Kautschuk betreffend, entnahm ich zum großen Teil der Dissertation des Herrn Reg.-Rat Dr. Geisler, dem ich auch an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank für Überlassung seiner sehr ausführlichen Arbeit ausspreche. Die Geislersche Arbeit ist erschienen im Forschungsheft Nr. 250 des Vereins Deutscher Ingenieure.

Digitized by Google

Der Ertrag hängt sehr von der Baumart, der Zapfungsmethode und der Jahreszeit ab. Wird der Baum gezapft ohne gefällt zu sein, fließt der Saft viel langsamer und spärlicher und gerinnt schneller, so daß der Ertrag merklich geringer ist und ist dies eine der Ursachen, weshalb die Malaien die Bäume zwecks Saftgewinnung fällen. Der Durchschnittsertrag eines ausgewachsenen Guttaperchabaumes beträgt nur 1 bis 4 kg und ist es daher nicht zu verwundern, daß die malaischen Sammler wie auch die chinesischen Händler durch Vermischung mit den Säften anderer Pflanzen Fälschungen vornehmen.

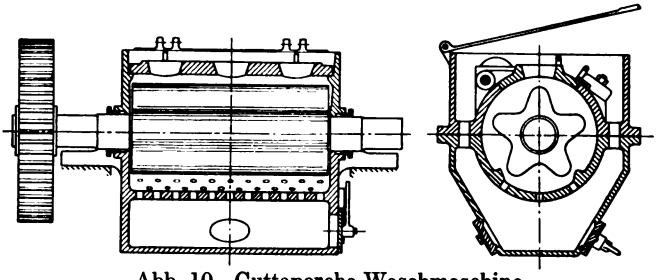


Abb. 10. Guttapercha-Waschmaschine.

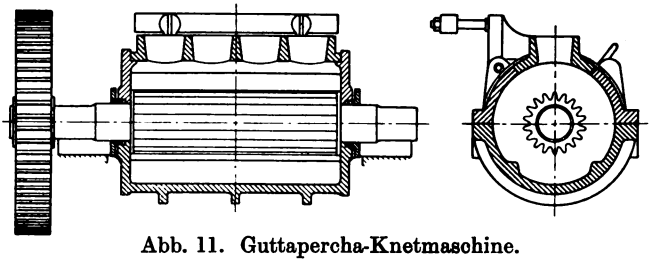


Abb. 11. Guttapercha-Knetmaschine.

Die Rohguttapercha muß wie Rohgummi vor Verwendung einer Reinigung unterzogen werden. Die rohen Stücke werden auf Schneidmaschinen in Scheiben geschnitten und gelangen dann auf mit Messern besetzte Trommeln, um zerkleinert zu werden. In kaltem Wasser wird die schwimmende Guttapercha von den schwereren Bestandteilen getrennt, dann in heißem Wasser erweicht und zusammengeknetet. Diese Masse kommt in die Waschmaschine (Abb. 10). Dieselbe besteht aus einem doppelten Gußgehäuse; in dem inneren Zylinder, in dem sich eine gewellte Walze dreht, wird das Material in heißem Wasser gegen zwei Nocken geknetet; die Unreinigkeiten werden durch die Löcher am Boden ausgeschieden. Dann kommt das Material in die Trockenknetmaschine (Abb. 11), die sehr ähnlich gebaut ist, nur daß der äußere Gußmantel fehlt, und die Knetwalze kleiner ist. Von dieser Maschine kommt das Material auf Kalander, wo es zu Platten ausgewalzt wird.

Digitized by Google

Das wesentliche Merkmal, durch welches sich Guttapercha von Kautschuk unterscheidet, ist die Eigenschaft, beim Eintauchen in kochendes Wasser weich und plastisch zu werden, dann jedoch beim Abkühlen jede ihr vorher gegebene Gestalt beizubehalten, hart aber nicht spröde wie andere Harze zu werden.

Bei gewöhnlicher Temperatur ist Guttapercha dicht, geschmeidig, sehr zäh, aber wenig elastisch. Das spezifische Gewicht beträgt 0,9 bis 1,02. Bei 37° C fängt Guttapercha an zu erweichen und ist bei 66° C plastisch, kann geknetet und in jede beliebige Form gedrückt werden. Bei 130° schmilzt sie.

Guttapercha brennt hell und hinterläßt einen leitenden Rückstand. Gegen Kälte ist sie nicht so empfindlich wie Kautschuk; sie konserviert sich am besten in kaltem Wasser. In nassem Zustand den Sonnenstrahlen ausgesetzt wird sie brüchig, verliert an Isolationsfähigkeit und wird sogar leitend. Der spezifische Widerstand guter, gereinigter Guttapercha beträgt 400×10^6 Megohm.

Die Guttapercha hat besondere Bedeutung erlangt durch die Erfindung Werner Siemens, der kurz nach dem Auftauchen dieses Materials die wunderbaren plastischen Eigenschaften als geeignet für Umhüllungen von Leitungsdrähten erachtete. Nachdem 1843 Faraday die gute Isolationsfähigkeit feststellte, verlegte Siemens 1847 bereits eine mit Guttapercha isolierte Telegraphenleitung von Berlin nach Großbeeren. Zur Herstellung der Isolationshülle hatte er eine besondere Drahtumpressungsmaschine erbaut, deren Konstruktion sich im großen ganzen bis heute erhalten hat. Das Original befindet sich im Reichspostmuseum.

Der Apparat besteht aus einem Zylinder, in welchen die heiße Guttapercha eingebracht ist und in dem ein Kolben mittels Schraubenspindel, die mit Schnecke und Schneckenrad bewegt wird, vorwärts getrieben wird. Der Draht läuft durch die Mitte der Schraubenspindel, die Guttapercha wird, ähnlich wie beim Spritzen von Hart- und Weichgummistäben durch eine Düse herausgedrückt und so als Mantel um den Draht herumgequetscht.

Abb. 12 zeigt die schematische Darstellung einer Guttapercha-Drahtisoliermaschine. Von der Trommel d_1 läuft der blanke Draht ab und durch den Zylinder c, der mit Guttapercha gefüllt ist, die unter dem Druck des Kolbens p steht, aus der Düse d tritt der umpreßte Draht heraus und geht zur Kühlung durch ein Wasserbad. Zum Schluß wird der Draht auf Trommel d_2 aufgewickelt.

Wenig später, 1849, wurde bereits das erste Unterseekabel, dessen Kupferleiter mit Guttapercha isoliert war, zwischen England und dem Kontinent verlegt.

Die guten plastischen Eigenschaften gestatten die Verwendung der Guttapercha für viele Zwecke, bei denen Gummi schwierig anzuwenden

Digitized by Google

ist, zumal die Vulkanisation fortfällt. Man fertigt aus Guttapercha außer der erwähnten Umhüllung von Leitungsdrähten für Unterseekabel auch die Umpressung der Adern von Zündschnüren für Sprengzwecke, ferner Manschetten für hydraulische Pumpen und Pressen, Säurepumpen, Zylinder und Kolben, Matrizen für Galvanoplastik, Walzenüberzüge für Druckereien und viele Gegenstände für chirurgische Zwecke. Allgemein bekannt ist das Guttaperchapapier, dies ist ganz dünn gewalzte Guttapercha. Auch bei dem bekannten Rißbeklebemittel für Stoffe: „Flicke mit Hitze" bildet Guttaperchapapier das Klebemittel.

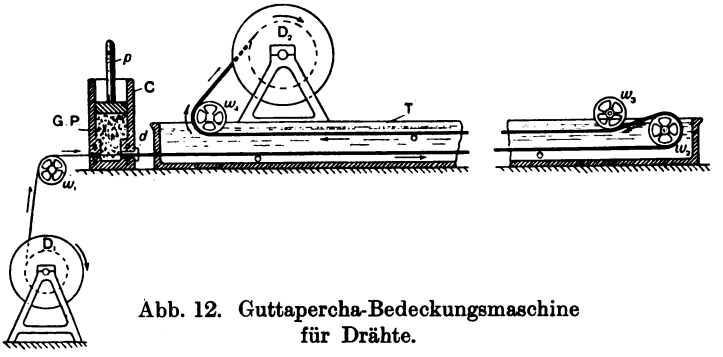


Abb. 12. Guttapercha-Bedeckungsmaschine für Drähte.

Wie die Guttapercha bei ihrem ersten Bekanntwerden für Kautschuk gehalten und mit diesem vielfach verwechselt wurde, ist es der Balata bei ihrem ersten Auffinden ergangen. Die Balata ist, wie die Guttapercha, der eingetrocknete Milchsaft von einigen Pflanzen aus der Familie der Sapotaceen, und zwar der Gattung der Mimusops und Chrysophillum. Die Tabelle 5 gibt einige Balatapflanzen und die handelsübliche Bezeichnung an.

Tabelle 5. Balatapflanzen.

Familie	Art	Vorkommen
Sapotaceen	Mimusops Balata	Französisch-, Englisch- u. Holländisch-Guayana, Antillen, Brasilien, Costa Rica
	„ globosa	Venezuela
	„ speciosa	Brasilien, Angola, Abessinien,
	Chrysophyllum ramiflorum	Neu-Süd-Wales, Queensland, Madagaskar, Mauritius-Inseln.

Balatasorten.

Blatt Balata, Block Balata: Venezuela.
Block Balata: Zentral-Amerika.

Zur Gewinnung des Latex genügt es nicht, Einschnitte in die Rinde zu machen, weil der Milchsaft sehr dick ist und so schnell gerinnt, daß die Einschnitte bald verstopft sein würden. In Venezuela

Digitized by Google

sägten daher die Sammler die Bäume einfach ab und ließen den Saft ablaufen. Man gewann aus alten Bäumen nur 3 bis 6 kg Balata. Dann wandte man Handpressen an, durch welche die Rinde des gefällten Baumes einem starken Druck ausgesetzt wurde und gewann so aus großen Bäumen 100 bis 150 kg Balata. Dieser Raubbau wird nur noch vereinzelt betrieben, meist werden die Bäume jetzt so gezapft, daß man die Rinde in Streifen bis zum Cambium abschält, ohne den Bast zu verletzen, damit die Wunde wieder zuheilt. Die Zwischenstreifen bleiben unverletzt bis zur nächsten Ernte. Der Latex wird in flache Schalen gegossen, das Wasser verdunstet und auf der Oberfläche bilden sich dicke Balatahäute, die an der Luft getrocknet werden.

Rohbalata ist grau, braun oder weißrötlich, mit dunkleren Flecken und Adern und fühlt sich seifig an. Die Bearbeitung der Rohbalata ist die gleiche wie von Guttapercha und erfolgt in gleichen Apparaten.

Der Hauptunterschied zwischen Guttapercha und Balata zeigt sich durch die Beeinflussung beider Produkte durch die atmosphärische Luft. Während Guttapercha unter der Einwirkung von Luft und Licht bald hart und brüchig wird, bleibt Balata unverändert. Bei gewöhnlicher Temperatur ist Balata weicher als Guttapercha. Das spezifische Gewicht ist 1,05; bei etwa 50° C läßt sich Balata beliebig formen.

Als Isolationsmaterial ist Balata unvermischt wenig geeignet. Sie wird jedoch der Guttapercha, wie auch dem Kautschuk in geringem Prozentsatz beigemischt und gibt diesen dadurch gewisse schätzenswerte Eigenschaften. Unvermischte Balata wird vorzugsweise zu Treibriemen verarbeitet, aber auch zu Matrizen für Galvanoplastik, zu Schweißblättern und zu chirurgischen Gegenständen.

Nicht erschöpfend konnte das große Gebiet: Gummi, Guttapercha und Balata behandelt werden, doch wird die Darstellung die Herren Konstrukteure und Betriebsingenieure anregen, stets das richtige Material an dem ihm zukommenden Platz zu verwenden.

Literaturverzeichnis:

Cramer, Dr. P. J. S., The Cultivation of Hevea. Amsterdam: J. H. de Bussy.
de Bois Maclaren, W. F., The Rubber Tree Book. London: Maclaren & Sons.
Rickinson & Son, W. H., The World's Rubber Position. London: Rickinson & Sons.
Clouth, Franz, Gummi, Guttapercha und Balata. Leipzig: Bernhard Friedr. Voigt.
Obach, Dr. Eugen, Die Guttapercha. Dresden: Steinkopf & Springer. — Gummizeitung (Berlin). — The India Rubber World (New-York).
Alexander, Dr., Kautschuk, Guttapercha und Balata (aus dem Ergänzungswerk zu Muspratts Chemie). Leipzig: Vierweg & Sohn.
Alexander, Dr., Theorie und Praxis der Regeneration von Kautschuk. Chemiker-Zeit. 1910, Nr. 88 (Cöthen in Anhalt).

Digitized by Google

VII. „Cellon"-Lacke als elektrotechnische Isoliermaterialien.

Von A. Eichengrün.

Bekanntlich spielt die Zellulose in der Isolationstechnik eine große Rolle und hat insbesondere während des Krieges, infolge des Mangels an edleren Isoliermaterialien neben den bereits gebräuchlichen Anwendungsweisen: Baumwollumspinnung, Preßspan, Vulkanfibre, in Form der Papier-, Papierband- und Papiergarnisolierung besondere Bedeutung erlangt, die sie auch nicht mehr verlieren dürfte. Das Gleiche gilt von einigen Derivaten der Zellulose, nämlich von den plastischen Massen und deren Lösungen, welche aus der Azetylzellulose, einem Produkt gewonnen werden, das durch die Einwirkung von Essigsäure-Anhydrid auf Zellulose entsteht. Auch die Azetylzellulose, welche schon zu Anfang dieses Jahrhunderts als Isolationsstoff empfohlen worden ist, hat als solcher erst größere Bedeutung während des Krieges erlangt, als man gezwungen war, sich nach Streckungsmitteln oder Ersatz der altbewährten und altgewohnten Isoliermaterialien umzusehen, und sich eingehender mit den bereits vorhandenen aber wenig beachteten oder gar mißachteten Ersatzprodukten zu beschäftigen. Wie es so vielfach ging, ist es auch bei der Azetylzellulose gegangen: das Ersatzprodukt hat sich nicht nur als Lückenbüßer erwiesen, dem man sobald wie möglich wieder den Abschied gab, sondern hat wertvolle Eigenschaften und erwünschte Besonderheiten gezeigt, die es in vielen Fällen, auch für Nachkriegszeit, vollkommen unentbehrlich gemacht, um ihm eine dauernde Verwendung gesichert haben. Der Grund hierfür liegt vor allem darin, daß die Azetylzellulose vollkommen andere Eigenschaften, insbesondere auch ein ganz anderes chemisches Verhalten besitzt, wie die bisher üblichen für die gleichen Anwendungsgebiete benutzten Stoffe und daß diese besonderen Eigenschaften naturgemäß für besondere Fälle von großem Werte waren und unter Umständen sogar die Möglichkeit boten, eine längst empfundene Lücke auszufüllen.

Ich erinnere beispielsweise an die höchst unangenehme und störende Eigenschaft der Mineralöle und insbesondere der Harzöle, alle Lackschichten und Isolierschichten anzugreifen. F. Frank S. 354 be-

Digitized by Google

zeichnet als einzige Lacke, welche dieser Einwirkung widerständen, die Bakelitlacke und die „Cellon"-Lacke.

Die „Cellon"-Lacke bilden nun diejenige Anwendungsform, in welcher die Azetylzellulose ihre größte Bedeutung als Isoliermaterial erlangt hat und diese sollen das Hauptthema meines Vortrages bilden; doch will ich, des besseren Verständnisses wegen, die Entwicklungsgeschichte und die Entstehung der Azetylzellulose, sowie die Fabrikation der plastischen Massen aus Celluloseestern etwas eingehender schildern.

Die typische am meisten bekannte und wirtschaftlich bedeutsamste plastische Masse ist das Zelluloid, jenes eigenartige Produkt, welches gewissermaßen eine gebändigte, ihrer Explosivität beraubte, Schießbaumwolle darstellt und welches seiner hervorragenden Eigenschaften, seiner großen Festigkeit, Zähigkeit, Bearbeitungsfähigkeit und seines Isolationsvermögens wegen einen ganz vorzüglichen Isolationsstoff bilden würde, wenn es nicht so außerordentlich feuergefährlich wäre. Das Zelluloid wird hergestellt aus Nitrozellulose und zwar aus einer bestimmten Nitrierungsstufe der Zellulose, welche als Kollodiumwolle bezeichnet wird und welche zwar nicht die hohe Sprengwirkung der eigentlichen Schießbaumwolle besitzt, aber doch ein starker Explosivkörper ist, der durch Initialzündung explodiert, bei offener Zündung überaus schnell verbrennt, d. h. verpufft. Durch Überführung in gelatinöse Form durch Behandlung mit Kampfer und einem Lösungsmittel, entsteht das Zelluloid, welches eigentlich eine starre Lösung von Schießbaumwolle in Kampfer dargestellt und dieses gibt schon bei einem Kampfergehalt von nur 30% der angewandten Nitrozellulose vollkommen veränderte Eigenschaften. Es ist eine plastische, biegsame, außerordentlich feste Masse, welche in Scheiben, Tafeln, Platten, Röhren und Stäben hergestellt werden kann und sich in jeglicher Weise mechanisch bearbeiten, vor allem aber auch in der Wärme ziehen oder zu Hohlkörpern ausblasen läßt. Da es sich außerdem leicht kleben läßt, würde das Zelluloid einen vorzüglichen Isolierstoff bilden, und beispielsweise dem Hartgummi in vielen Fällen vorzuziehen sein, insbesondere infolge seiner leichteren Verarbeitungsweise, wenn nicht seine große Brennbarkeit ein unüberwindliches Hindernis bildete. Dies um so mehr, als seine Brennbarkeit noch größer ist als diejenige der Schießbaumwolle. Zwar ist Zelluloid, wie schon gesagt, nicht mehr explosibel, dafür gibt es jedoch eine viel stärkere und heißere Flamme wie die Schießbaumwolle und entwickelt hierbei erhebliche Mengen erstickender, giftiger und ihrerseits wieder explosibler Dämpfe.

Es ist deshalb verständlich, daß das Zelluloid als eigentliches Isolationsmaterial überhaupt keine Anwendung gefunden hat und daß

Digitized by Google

seine Verwendungsgebiete für allgemeine elektrotechnische Zwecke relativ beschränkt sind. Das wichtigste Anwendungsgebiet, für welches es zufolge seiner großen Säurebeständigkeit besonders geeignet ist, dürfte die Herstellung von Akkumulatorenkästen sein, für welche es das einzige durchsichtige Material neben dem zerbrechlichen Glas bildet. Daneben kommen insbesondere Apparatenteile in Frage, wie Hörmuscheln, Sprechtrichter, Kurbeln und vor allem die Stöpsel und Druckknöpfe der Telephone und Schalteinrichtungen, für welche Zelluloid insbesondere gegenüber dem schwarzen Hartgummi die Möglichkeit bot, beliebige Färbungen in weiß, rot, grau usw. herzustellen.

Aber es leuchtet ein, daß auch für diese Verwendungszwecke die Feuergefährlichkeit des Zelluloids bedenklich ist, da beispielsweise ein Telephontrichter schon durch die Zigarre oder Zigarette des Sprechenden in Brand gesteckt werden kann. Infolgedessen sind auch die Postverwaltungen insbesondere für die Fernsprechämter vielfach zum Ersatz des Zelluloids durch andere Materialien wie Galalith, Vulkanfibre und vor allem Cellon übergegangen.

Das Cellon ist seinem äußeren Ansehen, seiner Eigenschaften, seiner Verarbeitungsweise und seinen Anwendungsgebieten nach ebenfalls als ein Zelluloid anzusprechen. Als eine besondere Art des Zelluloids, etwas weniger hart, etwas biegsamer und vor allem vollkommen ungefährlich, denn es brennt überhaupt nicht oder in einzelnen Qualitäten nur wie etwa Holz und entwickelt keinerlei, insbesondere keine gesundheitsschädlichen oder explosiven Dämpfe. In Wirklichkeit hat jedoch das Cellon in bezug auf Herstellung und Zusammensetzung mit dem Zelluloid nichts gemein, es enthält weder Nitrozellulose noch Kampfer, noch wird es wie Zelluloid durch Gelatinierung mit Alkohol-Äther oder mit Alkohol-Kampfer hergestellt, noch verhält es sich in bezug auf seine chemischen Eigenschaften insbesondere auf seine Löslichkeit wie Zelluloid. Es ist ein aus Azetylzellulose und Kampferersatzmitteln hergestelltes zelluloidähnliches, zelluloidartiges aber trotzdem von Zelluloid verschiedenes Material. Der Grund hierfür liegt vor allem in den von der Nitrozellulose durchaus abweichenden Eigenschaften der Azetylzellulose und vor allem derjenigen Azetylierungsstufe, welche für Cellonfabrikation allein in Frage kommt.

Es gibt nämlich verschiedenartige Azetylzellulosen von durchaus verschiedenartigen Eigenschaften, deren Hauptrepräsentanten das schon seit Mitte der 90er Jahre bekannte Zellulosetriazetat (die sogenannte chloroformlösliche Azetylzellulose) und die im Jahre 1905 von dem Amerikaner Miles einerseits, und unabhängig hiervon von mir in Gemeinschaft mit Dr. Becker und Dr. Guntrum andererseits nach voneinander verschiedenen Verfahren hergestellten azetonlöslichen Zellulose-Hydroazetate. (Cellit der Farbenfabriken vorm. Friedr. Bayer & Co.)

Digitized by Google

Das primäre Zellulosetriazetat entsteht aus Zellulose durch Einwirkung von Essigsäureanhydrid in Gegenwart von Eisessig und einer Kontaktsubstanz, als welche Schwefelsäure, Phosphorsäure, saure Salze und säureabspaltende organische Verbindungen wie beispielsweise Dialkylsulfate hauptsächlich in Frage kommen. Läßt man ein derartiges Azetylierungsgemisch auf Zellulose einwirken, so geht dieselbe in Lösung über und aus dieser scheidet sich beim Verdünnen mit Wasser, das neue Produkt in Flocken aus. Das Letztere besteht nicht immer aus reinem Triazetat, denn je nach der eingehaltenen Temperatur, der Einwirkungsdauer, der Art und Menge des Katalysators entstehen die verschiedenartigsten Zwischenstufen. Diese haben wieder ganz verschiedene Eigenschaften, vor allem ist ihre Haltbarkeit, d. h. die feste Bindung des Essigsäurerestes eine sehr verschiedene. Manche spalten in feuchter Atmosphäre — insbesondere beim Lagern — schon Essigsäure ab, manche erst bei Einwirkung von Wasser, einzelne reagieren an sich sauer, insbesondere die sogenannten Sulfoazetate, welche außer der Essigsäure- noch Schwefelsäuregruppen gebunden enthalten, und es liegt als Endprodukt der Azetylierung vielfach ein Gemisch dieser verschiedenen Stufen vor. Ich erwähne dies ausdrücklich, weil diese Tatsache für die Verwendung der Acetylzellulose für elektrotechnische Zwecke hinderlich gewesen ist.

Das Zellulosetriazetat ist praktisch nur in Chloroform löslich; alle übrigen Lösungsmittel sind ätzend oder giftig und kommen deshalb technisch nicht in Frage. In Chloroformlösung ist das Triazetat infolge seines hervorragenden Isolationsvermögens vielfach als Isolierstoff benutzt worden, insbesondere durch die General Electric Company und auch durch einige deutsche Gesellschaften, insbesondere durch die AEG. und zwar zur Herstellung isolierter Drähte, der sogenannten Azetatdrähte. Die Drähte wurden durch eine Chloroformlösung von Triazetat hindurchgeführt und dann zum langsamen Trocknen senkrecht, etwa 10 m hoch geleitet in eigens hierzu konstruierten Türmen, um eine Blasen- und Knotenbildung beim Trocknen zu verhindern. Diesen Versuchen ist viel Zeit und Geld geopfert worden, sie führten jedoch zu einem vollen Mißerfolge, da die Azetatisolierung nach einiger Zeit vollkommen brüchig wurde und abblätterte. Dies war nicht überraschend, sondern durch die Eigenschaften des Triazetates gegeben.

Verdunstet man nämlich die Lösung eines Triazetates in Chloroform auf einer Glasplatte, so entsteht eine schöne, klare und biegsame Folie, wie sie ähnlich beim Verdunsten einer Kollodiumlösung erhalten wird. Trocknet diese Folie aber längere Zeit an der Luft, so wird sie nach einigen Wochen vollkommen brüchig. Noch schneller tritt diese Erscheinung auf, wenn man die Folie in der Wärme trocknet, da sie dann schon nach wenigen Stunden, nämlich sobald die letzten

Digitized by Google

Reste Lösungsmittel ausgetrieben sind, brüchig werden kann. Der gegebene Weg — ebenso wie bei der Nitrozellulose — durch Zusatz von Kampfer die Brüchigkeit aufzuheben und Plastizität zu erzeugen, führte zu keinem Erfolg, da weder mit Kampfer noch mit Kampferersatzmitteln aus Triazetat ein wirklich plastisches bzw. plastisch bleibendes Material erzeugt wurde; im Gegenteil, es wurde in manchen Fällen die Brüchigkeit noch erhöht, wie dies beispielsweise beim Zusatz von Rizinusöl der Fall war, welches bekanntlich Schichten aus Nitrozellulose bzw. Zelluloid oder Kollodium weich und geschmeidig macht, der Azetylzellulose aber die Brüchigkeit von Glas verleiht. Es ist um so mehr verständlich, daß das Triazetat sich unter diesen Umständen als Isoliermaterial nicht bewährte, als, wie oben erwähnt, die Fabrikation eines stabilen, nicht Essigsäure abspaltenden Triazetates kaum möglich war, so daß die beiden größten Fehler einer Drahtisolierung: Brechen der Schicht und Grünspanbildung geradezu unvermeidlich waren.

Diese Mißerfolge haben nicht nur dazu geführt, die Verwendung von Zellulosetriazetat als Isoliermaterial vollkommen aufzugeben, sondern auch ein derartiges Vorurteil gegen Azetylzellulose geschaffen, daß deren Verwendung seitens vieler Firmen auch dann noch abgelehnt wurde, als es gelungen war, die Fehler vollkommen zu beseitigen.

Diese Beseitigung ist erst dadurch möglich geworden, daß an Stelle des unstabilen, primären Zellulose-Triazetates die absolut stabile, d. h. Essigsäure nicht abspaltende und sich auch in feuchter Atmosphäre nicht verändernde azetonlösliche Azetylzellulose, das Zellulose-Hydroazetat, welches ich bereits erwähnt habe, als Isolierstoff angewandt wurde.

Diese neue Azetylierungsstufe der Zellulose ist von dem früher angewandten chloroformlöslichen Triazetat so verschieden, wie etwa die zu photographischen Zwecken benutzte Kollodiumwolle von rauchlosem Pulver. Wie diese beiden Produkte zwei in ihren Eigenschaften vollkommen verschiedene Nitrierungsstufen darstellen, so bilden die chloroformlöslichen und azetonlöslichen Azetylzellulosen zwei voneinander vollkommen verschiedene Azetylierungsstufen der Zellulose. Die azetonlösliche Azetylzellulose ist in ganz anderen neutral reagierenden, nicht giftigen und nicht ätzenden Lösungsmitteln löslich. Ist, wie bereits erwähnt, vollkommen stabil und besitzt im Gegensatz zur chloroformlöslichen Azetylzellulose die Eigenschaft, mit verschiedenen Erweichungsmitteln plastische Massen oder dehnbare, nicht brüchig werdende Schichten zu geben, ähnlich, wie dies Kollodiumwolle mit Kampfer vermag. Da die beim Verdunsten der Lösung der azetonlöslichen Azetylzellulose zurückbleibenden Schichten absolut wasserfest, ölfest, schwer brennbar und hoch isolierend waren, war durch die Verwendung der neuen Azetyl-Hydrozellulose an Stelle des früher benutzten Zellulose-Triazetates ein brauchbarer Isolierstoff gegeben,

Digitized by Google

welcher die Fehler der chloroformlöslichen Azelylzellulose nicht mehr besaß. Im Anfange trat allerdings die Verwendung des neuen Produktes für die Elektrotechnik in den Hintergrund. Die Azetylzellulose diente zuerst für die Herstellung unbrennbarer Kinofilms: des Cellitfilms Bayer und dann in der Hauptsache zur Herstellung des unbrennbaren Zelluloids, des Cellons. Die Herstellung dieses Produktes beruhte auf einer höchst eigenartigen Reaktion, zu deren Verständnis ich nochmals auf die Zelluloidfabrikation zurückkommen muß. Bei der letzteren wird Nitrozellulose mit Kampfer und einem Lösungsmittel mechanisch verknetet. Hierbei bildet sich eine homogene Paste, welche plattenförmig ausgewalzt wird. Die Platten werden aufeinander gelegt; in einer hydraulischen Presse unter Erwärmung zusammengepreßt, so daß sie miteinander verschmelzen und einen einheitlichen Block bilden, der aus einer Masse besteht, die vollkommen einer erstarrten Gelatine gleicht. Man nennt diesen Vorgang deshalb auch das Gelatinieren der Nitrozellulose. In diesem gelatinösen Zustande wird das Zelluloid dann weiter verarbeitet, mittels eines automatischen Hobels in dünne Blätter, oder dicke Platten, oder in Stäbe geschnitten oder zu Röhren gepreßt. Dann wird das Lösungsmittel durch langsames Trocknen entfernt, wodurch die Masse aus dem gelatinösen Zustand in den der starren Lösung übergeführt wird, was infolge der langsamen Verdunstung aus dem Inneren heraus je nach der Dicke der Platten Tage, Wochen oder Monate dauert.

Beim Cellon lagen die Verhältnisse ungünstiger, denn die Azetylzellulose gibt zwar mit Kampferersatzmitteln plastische Schichten, wenn man die Lösungen ausgießt und trocknen läßt, aber nur bis zu einer Schichtdicke von etwa $^1/_2$ mm. Bei größerer Stärke erstarrt die Lösung auf der Oberfläche, während sie im Innern noch vollkommen flüssig bleibt, die Lösungsmittel können nicht vollständig entweichen und es bilden sich bei der geringsten Erwärmung Blasen. Es kann zwar statt einer flüssigen Lösung eine Paste erzeugt werden, diese läßt sich aber nicht auswalzen und zu Blöcken formen, da sie klebrig bleibt und nicht gelatiniert. Ich habe dann ein ganz eigenartiges Verhalten der Azetylzellulose konstatiert, welches die Grundlage der ganzen Fabrikation des Cellons und der „Cellon"-Lacke bildet. Die azetonlösliche Azetylzellulose ist vollkommen unlöslich in Alkohol, sie ist ebenso unlöslich in Benzol. Selbst wenn man die Flüssigkeiten erhitzt, geht keine Spur in Lösung, auch in einer Mischung von Alkohol-Benzol ist die Azetylzellulose in der Kälte vollkommen unlöslich. Erhitzt man aber diese Mischung, so geht die Azetylzellulose augenblicklich in Lösung, aus der sie sich beim Erkalten in Nadeln wieder ausscheidet. Setzt man hingegen vor der Ausscheidung, d. h. vor dem Erkalten ein Kampferersatzmittel hinzu, so erstarrt das Ganze zu einer gelatinösen Masse. Hierdurch war die Fabrikation des Cellons nach dem gleichen

Digitized by Google

Verfahren und mit den gleichen maschinellen Einrichtungen wie das Zelluloid gegeben, und dieselbe wird seit etwa 10 Jahren im Großen ausgeführt.

Das Cellon hat, wie schon gesagt, im allgemeinen die gleichen Eigenschaften wie das Zelluloid. Es wird in den gleichen Qualitäten und Färbungen und zu den gleichen Zwecken wie Zelluloid hergestellt und auch in der gleichen Weise bearbeitet, insbesondere auch wie dieses gezogen und geblasen. Sein Hauptunterschied gegen Zelluloid besteht in der geringen Brennbarkeit, die evident wird, wenn man beispielsweise zwei Streifen Cellon und Zelluloid gemeinschaftlich am unteren Ende anzündet, oder etwa zwei Puppen aus den beiden Materialien mit Papier umhüllt und dieses in Brand setzt. Im Augenblick sind diejenigen aus Zelluloid verschwunden, die aus Cellon jedoch unversehrt. Allerdings ist nicht jede Cellonqualität unbrennbar. Reines Cellon, insbesondere die glasklaren Scheiben, wie sie für Automobile, Flugzeuge, Zeppeline und zu vielen technischen Zwecken in der Elektrotechnik als Bedeckungs- und Bezeichnungsschilder benutzt werden, sind praktisch unbrennbar; je nach dem Härtegrade der betreffenden Cellonqualität zündet die Flamme überhaupt nicht oder es bildet sich eine kleine Flamme am Rande, welche von selbst wieder erlischt. Die Brennbarkeit ist in keinem Falle größer, wie etwa diejenige des Hartgummis.

Die Anwendungsgebiete des festen Cellons sind so außerordentlich mannigfach, daß von einer Aufzählung derselben abgesehen werden muß. Es sei nur speziell erwähnt, daß dasselbe als transparente Scheibe während des Krieges Anwendung gefunden hat für Zwecke, bei denen es nicht nur einen Ersatz bildete, sondern für welche überhaupt kein anderes ungefährliches Material vorhanden war, wie beispielsweise die Windschutzscheiben der Fliegersitze in den Flugzeugen (siehe Abb. 1) und der Zeppelingondeln (Abb. 2) und vor allem die Gasmaskenbrillengläser unserer Heere sowie derjenigen der Verbündeten.

Die eigentlichen elektrotechnischen Anwendungsgebiete sind hauptsächlich diejenigen, bei welchen die Brennbarkeit des Zelluloids dessen Verwendung verbietet oder unzweckmäßig erscheinen läßt, also insbesondere Telephonstöpsel, Trichter, Tasten, Bezeichnungsschilder, Schaltbretter, Griffe, Hebel und Knöpfe aller Art. Sehr vielfach wird Cellon an Stelle von Hartgummi beim Bau elektrischer Apparate benutzt, da ja seine leichte Verarbeitungs- und Klebefähigkeit hier von Vorteil ist, ferner im Signalwesen und bei den Lampen der elektrischen Bahnen in Form von roten, grünen und andersfarbigen Scheiben.

Die Durchschlagsfestigkeit des Zellons hängt nicht nur von der Dicke der Platten ab, sondern auch von der Härte und von

Digitized by Google

der Zusammensetzung des Cellons. Je weicher und biegsamer die Cellonplatte ist, desto geringer ist ihr Isolationsvermögen, je härter,

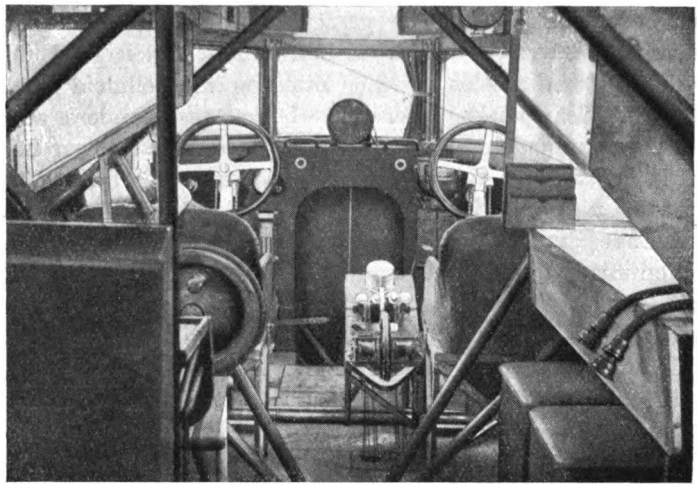


Abb. 1. Flugzeugführersitz mit „Cellon"-Scheiben.

desto größer ist die Durchschlagsfestigkeit. Die besten Werte gibt ein speziell für elektrotechnische Zwecke ausgearbeitetes Material, das

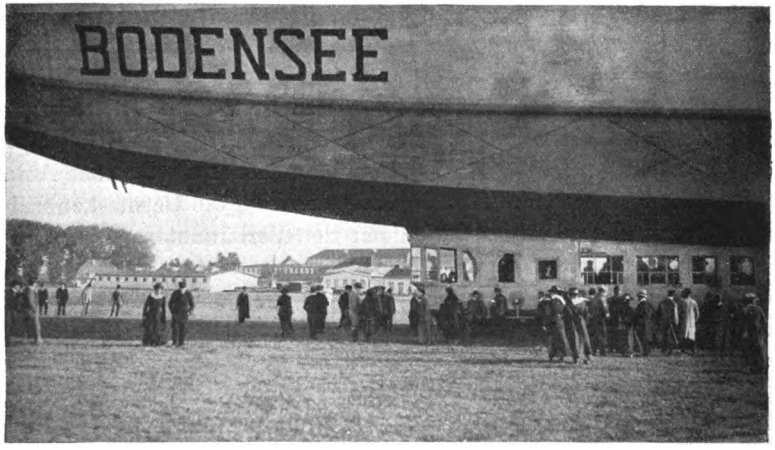


Abb. 2. „Zeppelin" mit „Cellon"-Fenstern und mit „Cellon"-Flugzeuglack gespannter Hülle.

„Hartcellon". Dasselbe ertrug im Durchschnitt bei einer Plattenstärke von 1 mm eine Durchschlagsspannung von 19900 Volt, bei 1,5 mm 24100 Volt, bei 2 mm 24750 Volt.

Digitized by Google

Ganz analog liegen die Verhältnisse bei den „Cellon"-Lacken, den wichtigsten aus Azetylzellulose hergestellten Isolierstoffen, denn die „Cellon"-Lacke stellen an sich nichts anderes dar, als Lösungen des festen Cellons, welche beim Verdunsten zusammenhängende, filmartige Schichten hinterlassen, die, abgesehen von Qualitätsunterschieden im Prinzip identisch sind mit den aus einem Cellonblock geschnittenen dünnen Tafeln. Hierdurch, d. h. durch diese Filmbildung, unterscheiden sich die „Cellon"-Lacke von allen in der Elektrotechnik gebräuchlichen Isolierlacken, insbesondere von den Sprit- und den Leinöllacken. Die Spritlacke sind durchwegs Lösungen von Harzen, insbesondere Kolophonium, Schellack, Weichkopalen, Kunstharzen usw., welche an sich ein gutes Isolationsvermögen besitzen, so lange sie auf einer festen Unterlage haften und keiner mechanischen Beanspruchung oder starken Biegung ausgesetzt sind, die aber nach allen Richtungen splittern und sogar abbröckeln, sobald sie durch Stoß oder Schlag verletzt werden oder wenn die Unterlage gebogen oder bewegt wird. Sie können nur in kleinen Splittern bzw. nur als Staub von der Unterlage wieder abgelöst werden, nicht, wie die „Cellon"-Lacke als zusammenhängende „Haut". Die Leinöllacke hingegen bilden nur dadurch zusammenhängende Überzüge, daß sie auf einer Unterlage bzw. in den Poren eines Gewebes, von dem sie aufgesogen werden, durch Oxydation in der Hitze erstarren, gewissermaßen gerinnen, so daß sie nur in Verbindung mit ihrer Unterlage ein Isolationsmaterial bilden, und sich ohne Zerstörung von der Unterlage nicht mehr trennen lassen. Die Leinöllacke sind deshalb hauptsächlich nur zur Imprägnierung von Geweben geeignet.

Ganz anders die „Cellon"-Lacke. Diese bilden für sich und an sich, ganz unabhängig von der Unterlage, filmartige Schichten, welche die damit behandelten Gegenstände nicht nur isolieren, sondern auch infolge ihrer Oberflächenhärte schützen, die weder springen, noch reißen, noch sich ablösen lassen und die nicht auf die Unterlage als Träger angewiesen sind, sondern im Gegenteil die Unterlage verstärken, da sie mit derselben eine Doppelschicht bilden. Diese Schichtbildung ist eine besondere Eigentümlichkeit der „Cellon"-Lacke und tritt insbesondere bei den harten Sorten, den eigentlichen Isolierlacken, in Erscheinung, insofern eine mit einem derartigen „Cellon"-Lack behandelte Umspinnung oder Umwicklung nach dem Trocknen nicht aus einem mit „Cellon"-Lack durchtränktem Gewebe besteht, wie dies bei der Leinölisolierung der Fall ist, sondern gewissermaßen von einem Cellonisolierrohr umhüllt ist. Am prägnantesten zeigte sich diese Erscheinung bei den Flugzeuglacken, bei welchen sie sich als besonders wertvoll erwies, da sie eine solche Spannung und Glättung der Tragflächen bewirkte, wie sie durch kein anderes bekanntes Mittel erzeugt werden konnte.

Digitized by Google

Tränkt man mit einem derartigen „Cellon"-Lack ein Gewebe durch und durch und läßt dasselbe in gespanntem Zustande trocknen, so zeigt sich, daß sich auf der Oberfläche eine einheitliche glatte Cellonfolie gebildet hat, während auf der unteren Seite des Gewebes trotz der vorhergehenden Tränkung keine Spur Cellon mehr vorhanden ist.

Diese Schichtbildung auf der Außenseite hat für manche Zwecke ihr gutes, sie gewährleistet sichere Schutzwirkung und große Gleichmäßigkeit der Oberfläche. Sie ist aber für andere Zwecke, insbesondere für die Isolation von Drahtumspinnungen und Wicklungen nachteilig, weil sie wohl die Gewebe von außen schützt und isoliert, die Zwischenräume und Maschen aber nicht ausfüllt. Dieser Fehler läßt sich nun dadurch beheben, daß man keine harten Cellonisolierlacke, sondern weiche „Cellon"-Imprägnierlacke anwendet, welche die Gewebe durchtränken, infolge ihrer gummiartigen Weichheit nicht das Bestreben zeigen, Außenschichten zu bilden, infolgedessen in den Fasern haften bleiben und mit denselben eine äußerst biegsame und geschmeidige Isolation bilden. Sie gleichen hierbei den Leinöllacken, vor welchen sie jedoch den großen Vorzug besitzen, daß sie nicht im Trockenofen bei hoher Temperatur zum Erstarren gebracht werden müssen, sondern bei gewöhnlicher Temperatur einfach durch Verdunstung der Lösungsmittel trocknen. Infolgedessen läßt sich mit „Cellon"-Lack ein Ziel erreichen, welches bisher nicht möglich war, nämlich die Herstellung fertig isolierter, umsponnener Drähte für die Ankerwickelei. Diese ließen sich mit Harzlacken deshalb nicht herstellen, weil die Schellack- oder Harzschicht beim Einziehen der Drähte zerbröckelt und herausgestäubt wäre. Bei Leinöllacken deshalb nicht, weil die imprägnierten Drahtrollen stundenlang auf hohe Temperaturen hätten erhitzt werden müssen, was technisch große Schwierigkeiten bereitet hätte, und die erstarrte Linoxylschicht beim Einziehen der Drähte dann gebrochen wäre.

Dagegen läßt sich die Vorcellonierung baumwoll- wie auch seidenumsponnener, sowie auch mit Papier umwickelter Drähte mit Leichtigkeit und mit einfachsten Apparaten und ohne Trockenofen ausführen. Die Cellonierung baumwollumsponnener Drähte bietet für den Dynamobau folgende Vorzüge:

1. Die Cellonierung erzeugt große Oberflächenglätte, die Umspinnung zieht sich beim Trocknen der Cellonschicht zusammen, die hervorstehenden Fasern werden festgeklebt, der Umfang wird geringer, wie bei Leinölimprägnierung. Das Einziehen der Drähte in die Nuten wird durch ihre Glätte erleichtert. Ein Paraffinieren der Drähte ist nicht mehr notwendig, (wenn auch bei den fertig cellonierten trocknen Drähten nicht schädlich).

2. Das Tränkungsverfahren (Vakuum) wird unnötig gemacht,

Digitized by Google

die hierfür bisher aufgewandte Arbeit, Zeit und Apparatur wird gespart. Diese Ersparnis ist besonders groß in Betrieben, in welchen eine zwei- oder mehrmalige Tränkung vorgenommen wird und insbesondere für die Fabrikation größerer Typen, für welche das Tränkungsverfahren umständlich ist, sowie bei der Tränkung von Spulen.

3. Die Ofentrocknung fällt vollkommen weg. Hierdurch wird nicht nur an Heizmaterial, sondern insbesondere an Zeit gespart, was unter Berücksichtigung des Umstandes, daß die Trockenöfen nur eine bestimmte Anzahl Anker fassen, (die Öfen also häufig besetzt sind), für jede Maschine eine Zeitersparnis von 2—3 Tagen ausmacht. Firmen, welche sich neu einrichten oder vergrößern, brauchen keine Trockenanlage zu bauen, ebensowenig wie sie Vakuumapparate aufzustellen

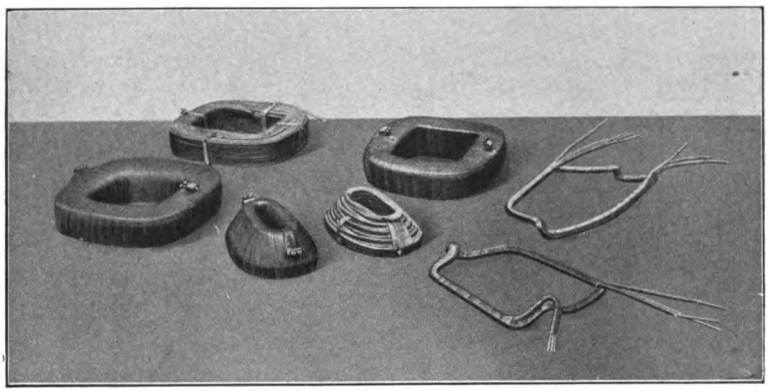


Abb. 3. Verschiedene cellonierte Drähte, Spulen und Kabelenden.

brauchen. Eine ganze Anzahl von elektrotechnischen Firmen arbeitet seit Jahren erfolgreich nach diesem Verfahren. Sie besitzen weder Vakuum noch Trockenofen.

4. Die Drähte können in den verschiedensten Härtegraden und damit in den verschiedensten Isolationswerten (600—3000 Volt) hergestellt werden. Und zwar kann dies ohne jegliche Änderung der Arbeitsweise geschehen, lediglich durch Anwendung verschiedenen harter Qualitäten „Cellon"-Lack. Ebenso lassen sich beliebige Färbungen der isolierten Drähte (gelb, rot, grün) usw. herstellen.

5. Die freiliegenden Drahtenden lassen sich mit Leichtigkeit abisolieren, da frisch aufgetragene „Cellon"-Lacke sich mit den bereits vorhandenen und getrockneten Schichten der „Cellon"-Isolierung untrennbar verbinden, während dies bei der Leinölisolation nicht der Fall ist und eine Ausbesserung ohne Trockenschrank bei der letzteren deshalb unmöglich ist.

6. Bei mit „Cellon"-Lacken isolierten Wicklungen ist Ozonbil-

Digitized by Google

dung ungefährlich, da Ozon auf Cellon nicht einwirkt. Es ist deshalb eine Ausfüllung der Zwischenräume (Compoundierung, Vakuumtränkung) unnötig.

Die Fabrikationsweise der vorcellonierten Drähte an sich ist sehr einfach. Der umsponnene Draht wird durch ein Cellonbad so hindurchgeführt, daß die Umspinnung gut durchtränkt und dann mit Hilfe eines Stoffbausches, einer eingekerbten Filzscheibe, einer Metalldüse usw. abgestreift wird. Der Draht wird dann auf eine Länge von etwa 10 m bei gewöhnlicher Temperatur angetrocknet und darauf durch eine Trockenvorrichtung (z. B. weite Metallröhre, Holzkasten usw.), welche durch Dampf oder mittels elektrischer Heizung auf etwa 50—60° erwärmt ist, geführt. Ein scharfes Trocknen ist zu vermeiden, da hierdurch eine Blasenbildung infolge zu schneller Verdunstung der Lösungsmittel erfolgen kann.

Die Erwärmung ist an sich nicht notwendig und dient nur zur Kürzung der Lauflänge des Drahtes vor der Wicklung auf die Vorratsspule. Der Draht kann gewickelt werden, sobald er nicht mehr klebt, d. h. nach wenigen Minuten. Ein Nachtrocknen findet auf der Vorratsspule selbst statt, da das Lösungsmittel leicht flüchtig ist und bei gewöhnlicher Temperatur vollständig verdunstet.

Je schärfer der Lacküberschuß abgestreift wird, desto schneller geht die Trocknung vor sich und desto glatter wird die Schicht, desto geringer naturgemäß auch die Schichtdicke. Es ist deshalb bei scharfem Abstreichen zweckmäßig, zweimal zu cellonieren. Hierdurch werden weder die Kosten, noch die Gesamtdicke der Drahtisolierung vergrößert, weil die „Cellon"-Schicht anstelle einer Baumwoll- (oder Seiden)-Umspinnung tritt, so daß eine Umspinnung gespart wird. Ein einfach umsponnener cellonierter Draht wird anstelle des doppelt umsponnenen Drahtes verwendet und übertrifft diesen an Isolationsvermögen, mechanischer Festigkeit, Wasserfestigkeit usw. um ein erhebliches, selbst wenn, wie das leicht möglich ist, eine viel weitmaschigere, also billigere Umspinnung angewendet wird wie bisher.

Diese Art der Vorcellonierung der Drähte macht naturgemäß jede weitere Isolierung der Spulen und Wicklungen bzw. der ganzen Anker und Gehäuse, d. h. das übliche Tränkungsverfahren und die damit verbundene Anwendung von Trockenöfen unnötig, was eine erhebliche Ersparnis an Lackverbrauch, Heizkosten und auch an Zeit bedeutet, da die Motoren nach der Wicklung bzw. nach dem Einlegen der Drähte fertig sind und keiner Nachbehandlung, etwa mit Ausnahme einer Überkleidung der Spulen- bzw. Ankerköpfe mit „Cellon"-Schutzlack, mehr bedürfen.

Im allgemeinen werden die „Cellon"-Lacke im Motorenbau, (da das Vorcellonierungsverfahren neueren Datums ist), hauptsächlich nach den

Digitized by Google

üblichen Tränkungsverfahren verarbeitet, sei es durch Vorstreichen der Drähte während des Wickelns, sei es durch Eintauchen der Spulen in „Cellon"-Drahtlack und nach dem Bandagieren in „Cellon"-Schutzlack sei es durch Imprägnierung der fertigen Anker mit dem Drahtlack AJD. usw.

Zur Erleichterung des Eindringens der Imprägnierung in die unteren Drahtlagen werden die Maschinenteile zweckmäßig vorher auf

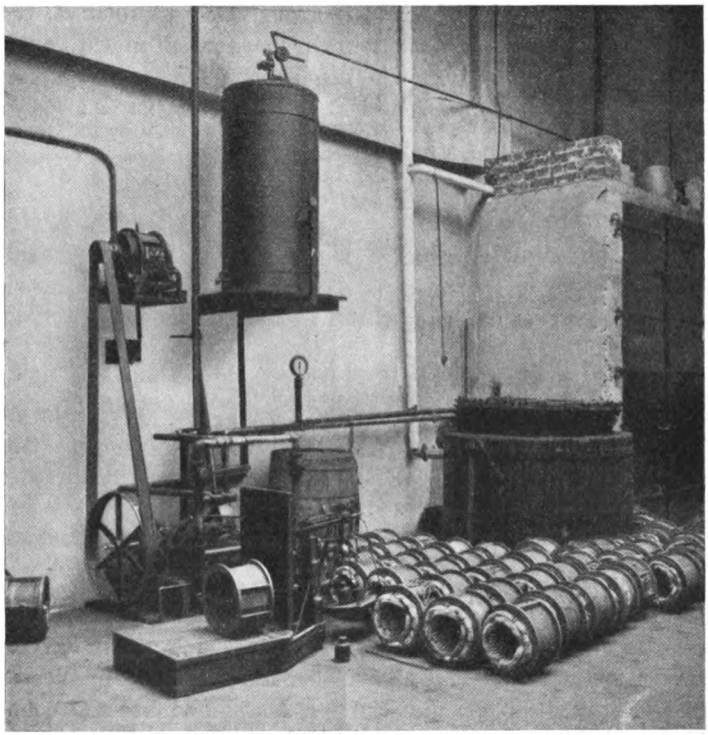


Abb. 4. Serienweise Cellonierung von Motoren.

etwa 80° erwärmt, dann warm in den „Cellon"-Drahtlack eingetaucht und verbleiben in dem Bade, bis auch beim Bewegen derselben keine Luftblasen mehr aufsteigen. Dann nimmt man die getauchten Gegenstände aus dem Bade, läßt sie über demselben kurz abtropfen und hängt oder stellt sie in ein zweites Gefäß (z. B. einen mit Blech ausgeschlagenen Kasten) zum Abtropfen auf, wobei zweckmäßig das Gefäß so groß gewählt wird, daß die Wände desselben höher sind wie die Apparateteile, um den Luftzug, welcher leicht eine zu schnelle Trocknung der oberen Schicht verursacht, abzuhalten.

Da die „Cellon"-Lacke nicht, wie der Öllack, dochtartig von der

Digitized by Google

Wicklung aufgesaugt werden, ist es bei größeren Motortypen bzw. bei mehrfachen Wicklungen zweckmäßig, die „Cellon"-Lacke mit Hilfe eines Wasserbades durch einstellen der Kanne in warmes Wasser oder auf einer elektrisch geheizten Platte leicht zu erwärmen (nicht mit offener Flamme da brennbar) da dieselben schon bei einer Temperatur von 30—40° ganz wesentlich dünnflüssiger werden und infolgedessen leichter eindringen. Nach dem Antrocknen, also nach etwa $^1/_2$ Stunde, werden die cellonierten Teile aus dem Abtropfbehälter herausgenommen, an der Luft bei gewöhnlicher Temperatur fertig getrocknet, bis sich kein Geruch nach Lösungsmitteln mehr bemerkbar macht, was nach 3—4 Stunden der Fall ist. Um die letzten Lösungsmittelreste aus den unteren Drahtlagen mit Sicherheit zu entfernen, ist es zweckmäßig,

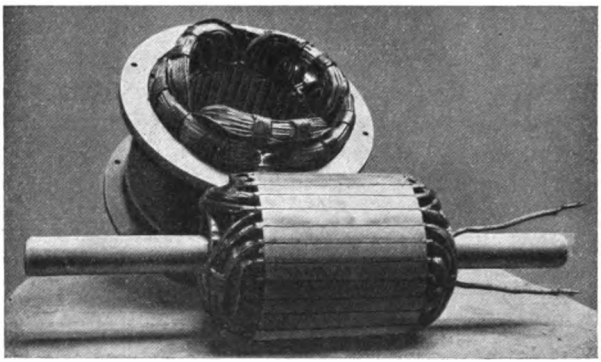


Abb. 5. Läufer und Ständer eines Drehstrommotors mit „Cellon"-Drahtlack AID. imprägniert und „Cellon"-Schutzlack H 15 gelb gestrichen.

die getrockneten Anker entweder stark zu lüften oder kurze Zeit, etwa 1 Stunde, in einem erwärmten Raum bzw. in einem leicht angeheizten Trockenofen bei etwa 40—50°, oder aber auf elektrischem Wege durch langsames Einschalten der unbelasteten Maschinen nachzutrocknen.

Die Imprägnierung von einzelnen Spulen kleinerer Typen läßt sich, wie bemerkt, ohne eine derartige Vorsichtsmaßregel vornehmen, da der „Cellon"-Drahtlack in diese Spulen auch in der Kälte sehr leicht eindringt und in kurzer Zeit trocknet, so daß dieselben alsbald mit „Cellon"-Schutzlack überkleidet werden können. Dieses Verfahren hat sich insbesondere für Motorreparaturen bei Straßenbahnen, Fabrik-, Hütten- und Bergwerksbetrieben, Reparaturanstalten usw. ausgezeichnet bewährt und wird seit Jahren dauernd angewandt.

Der eben erwähnte „Cellon"-Schutzlack gehört einem ganz anderen Typ an, wie der „Cellon"-Draht- oder Imprägnierlack und besitzt ganz andere Eigenschaften wie dieser. Zur Erklärung möchte ich zunächst einige allgemeine Bemerkungen über die „Cellon"-Lacke machen.

Digitized by Google

Wie schon vorher erwähnt, sind die „Cellon"-Lacke im Prinzip Lösungen des festen Cellons. Naturgemäß ist es nicht notwendig, zunächst festes Cellon in Platten herzustellen und diese wieder aufzulösen, sondern man geht von den Lösungen aus, die, wie vorher erwähnt, beim Erwärmen von Azetylzellulose mit Alkohol und Benzol entstehen. Hierbei hat sich eine zweite, höchst merkwürdige Tatsache herausgestellt, daß nämlich jede Erwärmung unnötig wird, wenn man dem Gemisch geringe Mengen eines Kaltlösungsmittels zusetzt. Dieses Gemisch aus drei Komponenten, zwei Nichtlösern, Alkohol und Benzol, sowie ein Löser, z. B. Azeton, löst Azetylzellulose schon in der Kälte. Durch Verschiebung der quantitativen und qualitativen Verhältnisse zwischen Lösern und Nichtlösern, durch Anwendung hochsiedender und niedrigsiedender Lösungsmittel nebeneinander, durch Zusatz verschiedener Erweichungs- und Plastifizierungsmittel, lassen sich auf diese Weise dann Lacke von verschiedenartiger Viskosität, verschiedenartiger Trocknungsgeschwindigkeit, verschiedenartigem Eindringungsvermögen und aus diesen Lacken wiederum Schichten von den verschiedenartigsten Eigenschaften, insbesondere in bezug auf Schichtdicke, Härte, Festigkeit und Dehnbarkeit erzeugen.

Es können auf diese Weise Lacke erhalten werden, von der Dünnflüssigkeit des Zaponlackes, welcher, wie diese, hauchdünne, fast unsichtbare Lackschichten auf polierten Metallen geben, bis zu Lösungen von der Dickflüssigkeit des Honigs, ja selbst bis zur Konsistenz eines Kittes, mit welchem Überzüge von Fingerdicke und darüber hinaus erzeugt werden können. Zwischen diesen Extremen liegen alle möglichen Stufen der Viskosität und dies ist wichtig nicht nur mit Hinsicht auf die Regulierung der Schichtdicke, sondern auch auf die Verarbeitungsverfahren, denn es ist auf diese Weise möglich, die Lacke den verschiedenen Arbeitsweisen und Arbeitsmethoden anzupassen, je nachdem sie mit dem Pinsel aufgestrichen oder durch Tauchen, durch Aufgießen, durch Aufwalzen, Aufspachteln oder mit der Spritzpistole aufgetragen werden sollen.

In noch weiterem Maßstabe, wie in bezug auf Viskosität und Konzentration, lassen sich die „Cellon"-Lacke in bezug auf die Eigenschaften der von ihnen gebildeten Schichten variieren, und zwar sind die Grenzen hierbei wesentlich weiter gesteckt, wie beim festen Cellon, weil dessen Fabrikation unter allen Umständen von der Möglichkeit der Herstellung harter, schneidbarer Blöcke abhängt, dagegen werden die „Cellon"-Lackschichten ja stets auf Unterlagen erzeugt, von denen sie nicht abgehoben zu werden brauchen, so daß man viel weichere und dehnbarere Sorten (von fast gummiartiger Beschaffenheit) herstellen kann, wie nach dem Gelatinierungsverfahren für festes Cellon. Dies ist für die Imprägnierung von Umspinnungen und Wicklungen, sowie

Digitized by Google

insbesondere für die Fabrikation wasserfester und öldichter Stoffe von Wichtigkeit. Es können auf diese Weise Schichten von solcher Härte, daß sie kaum durch Hammerschläge verletzt werden können, über alle Zwischenstufen hin, bis zur Weichheit der Guttapercha oder gar des Wachses, erzeugt werden. Hierdurch ist man imstande, sich nicht nur den zu bearbeitenden Materialien anzupassen, je nachdem es sich um hartes Metall, Stein oder Holz, oder um biegsames Papier oder um weiches Gewebe handelt, sondern auch den jeweils gewünschten Eigenschaften, je nachdem eine starre oder eine nachgiebige, eine biegsame oder eine harte Schicht erzeugt werden soll.

Der Härtegrad ist für alle typischen Eigenschaften maßgebend. Je härter die „Cellon"-Schicht ist, desto größer ist ihre mechanische Festigkeit, ihre Widerstandsfähigkeit gegen Agentien und ihr Isolationsvermögen.

An Cellonlackfolien, die durch Aufstreichen auf Glasplatten hergestellt waren, hat die Phys.-Techn. Reichsanstalt folgende Durchschlagspannungen mit Wechselspannung von 50 per/sec. nach verschiedenen Vorbehandlungen festgestellt; jede Zahl ist das Mittel aus 8 Einzelwerten.

A Im Zustand der Ankunft.
B Nach 24stündigem Hängen im Raum von 80% relativer Feuchtigkeit.
C Nach 24stündigem Liegen in Wasser und $^1/_2$stündigem Hängen im Raum von 56% relativer Feuchtigkeit zum Abtropfen.
D Nach 2stündigem Erhitzen auf 100° C in Luft und Wiedererkalten.
E Nach 48stündigem Liegen an Luft nach Vorbehandlung D.

Name des Cellonlackes	Durchschlagspannung in Kilo-Volt eff.					
	Dicke mm	A An-kunft	B n. 24 h 80% r. F.	C n. 24 h Wässern	D n. 2 h 100° C	E 48 h n. D
Hartlack R	0.036	2.8	2.7	2.2	3.5	3.6
Isolierlack AJ 3	0.061	2.6	2.6	2.0	3.1	3.1
Schutzlack HG 15	0.106	3.1	2.7	2.7	4.8	5.5
Isolierlack AJ 8 mittelweich	0.078	3.7	3.3	1.7	3.3	3.4
Drahtlack AJD	0.086	2.7	2.2	1.2	4.1	4.4
Tauchlack H 30 konz. . . .	0.097	4.4	4.3	3.0	5.4	6.3
Gewebelack MW weich, farbl.	0.183	1.4	1.3	1.5	2.5	2.8
Gewebelack HW 30 weich, weiß	0.173	2.4	1.8	1.0	2.6	
Lack CC 15 säurefest . . .	0.084	2.9	2.7	2.4		
Alumin. Grundiert. BL blau	0.274	1.9	0.8	0.3		
Rostschutzlack RL grau . .	0.121	1.9	1.4	1.0		
Imprägnierlack WFOL. . .	0.081	4.8	3.7	3.1	4.5	
Imprägnierlack WF hart . .	0.065	2.3	3.2	3.3	4.1	
Imprägnierlack WF dunkel II	0.066	3.6	3.1	3.4	4.0	

Digitized by Google

Die ersten 5 Lacke sind nach der Härte geordnet; die neuerdings herausgebrachten Cellon-Imprägnierlacke WF unterscheiden sich von den normalen Cellonlacken dadurch, daß sie weniger zur Schichtbildung neigen, die Gewebe also mehr in der Art von Öllacken durchtränken und auch auf Öllackisolierungen, zum Teil sogar auf Wachsisolierungen gut haften.

Die Tabelle zeigt, daß die dünnen Cellonschichten im allgemeinen auch durch Feuchtigkeit und Lagern in Wasser in ihrer Durchschlagfestigkeit nicht oder nur mäßig beeinträchtigt werden.

Je weicher die „Cellon"-Schicht ist, desto geringer ist die Isolationsfähigkeit, aber desto größer ist naturgemäß die Dehnbarkeit, so daß ein harter „Cellon"-Lack auf einen Leitungsdraht diesen in hervorragender Weise isolieren, und gegen alle äußeren Einflüsse schützen, beim Umknicken des Drahtes aber vielleicht reißen würde, während ein weicher Lack jede Biegung aushalten, aber nicht so gut isolieren würde. Hier bewährt sich nun die besondere Eigenschaft der „Cellon"-Lacke, daß dieselben sich in einzelnen Schichten übereinander aufgetragen — auch wenn sie durchaus verschiedener Zusammensetzung sind — sich innig und untrennbar miteinander verbinden. Auf diese Weise lassen sich Doppelschichten aus weichen und harten, aus dehnbaren und spröden, aus imprägnierenden und nicht eindringenden, aus farbigen und farblosen, aus deckenden und transparenten Lacken machen, die verschiedensten Kombinationen herstellen und Fehlerquellen beseitigen. Würde man z. B. ein Papier oder ein Gewebe mit einem sehr harten „Cellon"-Lack behandeln, so würde dasselbe zwar hohe Durchschlagswerte zeigen, aber derartig hart und steif werden, daß es sich kaum biegen lassen würde. Würde man das Gewebe mit einem weichen „Cellon"-Lack behandeln, so erhielte man ein biegsames, aber weniger isolierendes Material. Celloniert man jedoch zuerst mit einem weichen „Cellon"-Lack und dann mit einem harten, so erhält man eine Doppelschicht von großer Dehnbarkeit einerseits und großer Oberflächenhärte andererseits.

Die Erzeugung derartiger Doppelschichten ist auch in anderer Hinsicht wichtig. Je härter die „Cellon"-Schicht ist, desto schlechter haftet sie auf einem glatten Untergrund, je weicher, desto besser. Streicht man einen harten Isolierlack auf glatte Flächen wie Glas Porzellan, Metall, Hartholz, ja selbst auf geleimte Flächen, so kann man die Schicht vollkommen als zusammenhängenden Film wieder ablösen. Bei einem weichen „Cellon"-Lack, inbesondere bei den „Cellon"-Grundierlacken, gelingt es jedoch nur, ganz kleine Partikel abzulösen. Man kann infolgedessen auf glatten und harten Gegenständen einen hochisolierenden harten „Cellon"-Lack zum Haften bringen, indem man vorher eine Schicht eines gefüllten „Cellon"-Lackes („Cellon"-Grundierlack) aufträgt.

Digitized by Google

Für die meisten Zwecke, wo es sich nicht um Hochspannung handelt, genügt allerdings ein „Cellon"-Lack von mittleren Eigenschaften, der normale „Cellon"-Lack, welcher Schichten ungefähr von den Eigenschaften des festen Cellons in Platten oder Scheiben liefert. Diese typischen Eigenschaften sind die folgenden:

Die „Cellon"-Schichten, die beim Trocknen der Cellonlacke entstehen, besitzen eine große mechanische Festigkeit, werden durch Reibung und Schlag nur schwer verletzt, sind sehr widerstandsfähig gegen Wasser, Öl, Fett, Benzin, Petroleum, Terpentinöl, Spiritus, Benzol, Vaseline, Paraffin usw., gegen verdünnte Säuren und Alkalien,

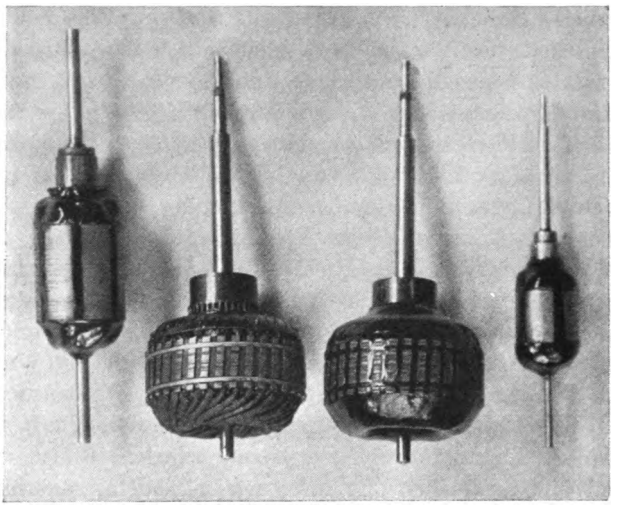


Abb. 6. „Cellon"-Schutzlack auf Ankerköpfen.

gegen chemische Gase aller Art, insbesondere auch gegen Sauggas, schweflige Säure, Ammoniakdämpfe, Chlor und gegen Ozon. Diese letztere Eigenschaft ist besonders wichtig für den Motorbau, da ja das bisher ausschließlich verwandte Leinöl bekanntlich durch Ozon stark angegriffen wird, so daß ein Ausgießen der Zwischenräume mit Compoundmasse bei der Cellonierung vollkommen überflüssig wird. Einer der wichtigsten Unterschiede gegenüber den Leinöllacken liegt aber vor allem in der Trocknung bei gewöhnlicher Temperatur ohne Erhitzung und ohne Trockenofen, in der außerordentlich kurzen Trocknungszeit von wenigen Minuten gegenüber Stunden oder Tagen bei Leinöllacken, sowie in der Möglichkeit der Wiederentfernung der ganzen Isolation oder einzelner Stellen durch Abwaschen mit einem Lösungsmittel („Cellon"-Verdünnung oder Azeton) und dann Neulackierung. Dies ist bekanntlich bei Leinöllacken nicht möglich, da die nach dem

Digitized by Google

Trocknen entstehenden Oxydationsprodukte desselben in allen Lösungsmitteln unlöslich sind und nicht mehr entfernt werden können. Wichtig ist auch das bei Leinöllacken ebenfalls fehlende Haftvermögen

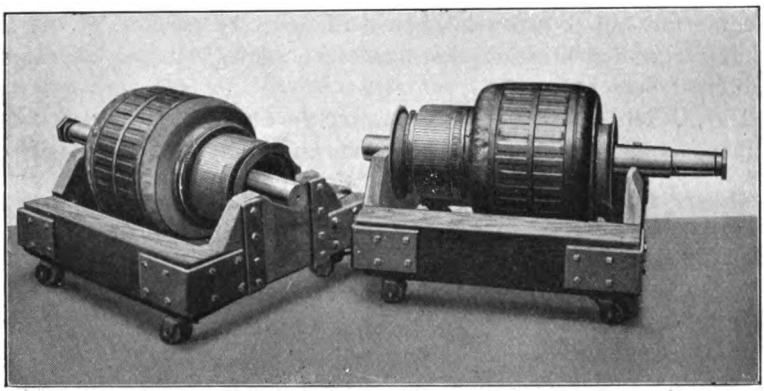


Abb. 7. Cellonierter und mit „Cellon"-Schutzlack eingekapselter Drehstrommotorständer und Läufer.

von frisch aufgetragenen „Cellon"-Lackschichten auf bereits getrockneten, wodurch Ausbesserungen erleichtert werden.

Diese letztere Eigenschaft führt insbesondere zur Anwendung der „Cellon"-Lacke als Schutzlacke zur nachträglichen Überkleidung

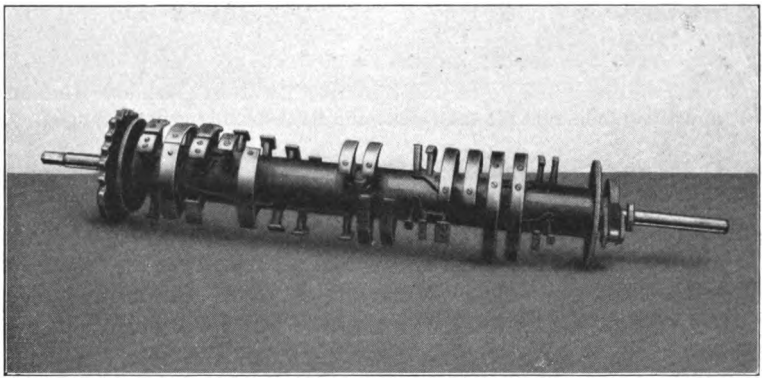


Abb. 8. Cellonierte Kontrollerwalze.

bereits mit weicheren „Cellon"-Lacksorten vorbehandelter Leitungs- oder Apparateteile oder ganzer Maschinen, wie z. B. von Spulen, Ankerköpfen, (siehe Abb. 6) gegen mechanische Verletzungen von Induktorankern, gegen das Durchschneiden der Isolierung durch die feinen Drähte der Umwicklung, bei Motoren in Fabrikbetrieben und

Digitized by Google

in Bergwerken gegen die Einwirkung von Sauggas, chem. Dämpfen, Kalistaub usw., von Freileitungen gegen Witterungseinflüsse usw.

Hierzu eignen sich besonders der Schutzlack HG 15 und der Drahtlack AJD. Wie die Tabelle der Messungen der Phys.-Techn. Reichsanstalt auf S. 326 zeigt, haben diese Lacke auch unter der Einwirkung von Feuchtigkeit eine bemerkenswerte Durchschlagfestigkeit in dünnen Schichten.

Die „Cellon"-Lacke werden im Motorenbau (s. Abb. 4—7) sowohl zum Neubau, als auch in sehr großem Umfange zu Reparaturen von durch-

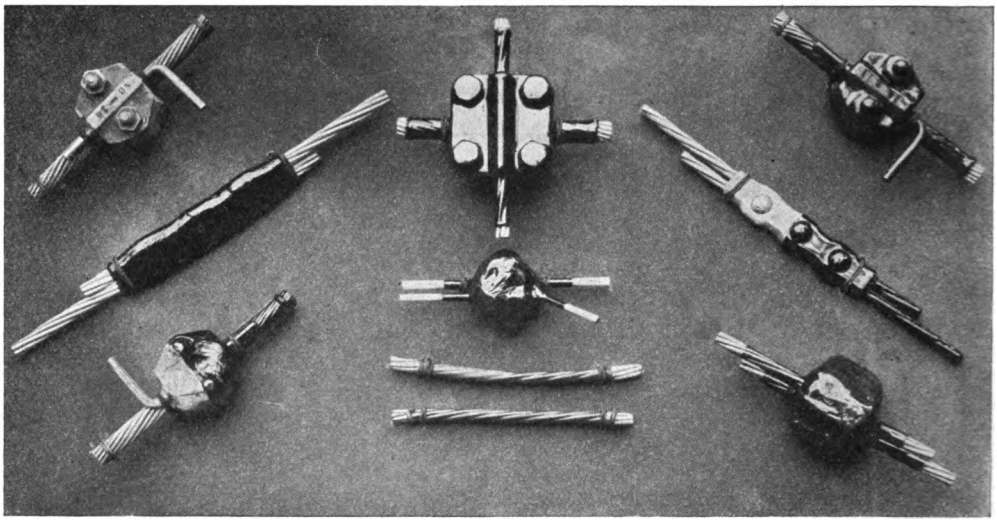


Abb. 9. Cellonisolierte und gegen Luftoxydation bzw. Rost geschützte Aluminium- und Eisenteile und Klemmstücke für Hochspannungsfreileitungen.

gebrannten Motoren bzw. Spulen verwendet und es hat sich verschiedentlich gezeigt, daß Anker, die aufgelaufen waren und sehr starke Beschädigungen der Baumwollumspinnungen aufwiesen, nach mehrmaligem Streichen mit „Cellon"-Drahtlack (sofern dafür gesorgt war, daß blanke Drähte sich nicht berührten) oder mit „Cellon"-Imprägnierlack, ohne Neuwicklung oder Zwischenlage eines Gewebes, selbst dann noch weiter verwendet werden konnten, wenn die beschädigten Umspinnungen nebeneinander lagen.

Die „Cellon"-Lacke bilden eben überall da, ganz gleichgültig, ob eine Unterlage vorhanden ist oder nicht, eine hochwertige Isolierschicht. Hierdurch sind sie auch nicht nur, wie die Öllacke, für die Isolierung der Umspinnungen zu benutzen, sondern eignen sich für die verschiedenen Anwendungsgebiete und Verwendungszwecke, wie beispielsweise zum Streichen der Kollektorstirnisolationen zum Schutze gegen

Digitized by Google

das Eindringen von Graphit, oder metallführende Öle, zum Schutze der Glimmerkappen, Ankerkappen, der Bürstenbrücken, sowie zum Schutz der Spulen, insbesondere der Feldspulen, gegen aufspritzendes Öl usw.

Insbesondere bei Freileitungen aus Eisen und Aluminium haben sich die „Cellon"-Lacke, speziell während des Krieges, glänzend bewährt, und sind viele 10 000 km Hochspannungsleitungen der Überlandzentralen mit „Cellon"-Rostschutzlack, bzw. „Cellon"-Aluminiumlack behandelt und die Klemmen und Nietverbinder mit „Cellon"-Kitt gedichtet worden (siehe Abb. 9).

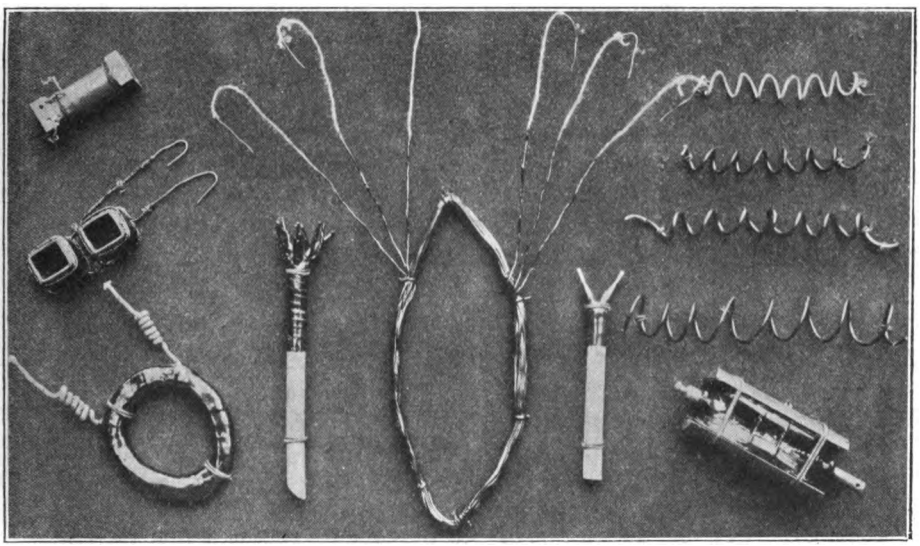


Abb. 10. Cellonierte Spulen, Kabelenden, Induktoranker.

Der „Cellon"-Kitt ist als ein sehr dickflüssiger, stark gefüllter „Cellon"-Lack anzusehen, welcher an allen Unterlagen fest haftet, alle Hohlräume vollkommen wasserfest und ölfest ausfüllt, niemals brüchig wird, nach dem Trocknen schneid- und bearbeitungsfähig ist und durch Erwärmung plastisch gemacht werden kann. Er dient nicht nur zur Ausfüllung von Hohlräumen zur Verhinderung der Elektrolyse, sondern auch zum Ausgleichen von Unebenheiten, indem er als Spachtelmasse auf Guß aufgetragen, eine vollkommen glatte Oberfläche erzeugt und dann als Unterlage für den eigentlichen, emailleartige Schichten gebenden „Cellon"-Lack dient.

Die besten emailleartigen Effekte werden erzielt durch Anwendung eines sehr hoch konzentrierten „Cellon"-Tauchlackes, bei welchem eine einmalige oder zweimalige Tauchung genügt, um millimeterstarke, gut isolierende „Cellon"-Schichten zu geben, die die getauchten Gegenstände so gleichmäßig umhüllen, daß sich nicht mehr erkennen läßt, aus

Digitized by Google

welchem Material (Holz, Metall, Karton usw.) dieselben bestehen. Derartige Überzüge spielen insbesondere für die Isolierung von Werkzeugen, Zangen, Griffen usw. eine große Rolle. Auch hier wird zur Erzielung hoher Durchschlagswerte eine Umhüllung der Werkzeuge und auch von Leitungsteilen, z. B. bei Einführungen, „Cellon"-Kitt in fingerdicker Schicht angewandt.

Genau im Gegensatz hierzu werden für viele Zwecke der Schwachstromtechnik nur sehr dünnflüssige und sehr dünne Schichten erzeugende Lacke gebraucht, wie insbesondere zur Isolation der Abzweigungen und der Kabelenden von Telephonkabeln mit Baumwoll- oder Papierisolation und ganz neuerdings zur Herstellung feinster isolierter Kupferdrähte von 0,01 mm ab, anstelle der Emailledrähte. Gegenüber den letzteren besteht der große Vorzug der cellonierten Drähte einerseits in der Ersparung der sehr große Kosten verursachenden Heizung, andererseits in der Möglichkeit der Herstellung beliebig dicker, sowie auch bunter Überzüge, in roter, grüner, weißer, gelber usw. Färbung, während die üblichen Emailledrähte bekanntlich nur in schwarz hergestellt werden können.

Die Anwendungsgebiete der „Cellon"-Lacke in der Stark- und Schwachstromtechnik und für die verschiedenartigsten Spezialzwecke, wie z. B. lichtechte Glühlampentauchlacke, ölfeste Auskleidung von Transformatorrohren, Zusammenkleben schlecht aufeinander haftender Materialien, Überkleidung leicht oxydabler Metalle, Lackierung niedrig schmelzender, die Ofentrocknung nicht aushaltender Legierungen, sind so vielseitig, daß sie hier nicht aufgezählt werden können. Die Tatsache, daß weit über hundert verschiedene „Cellon"-Lacksorten für Spezialzwecke im Handel sind, dürfte einen genügenden Beweis für die Vielseitigkeit der Anwendungsgebiete geben.

Diese Vielseitigkeit erklärt sich in erster Linie aus den besonderen Eigenschaften der „Cellon"-Lacke, die es ermöglichen, sie an Stelle einer ganzen Anzahl anderer Materialien, wie Gummi, Zelluloid, Leinöl, Schellack, Kopal, Wachs, Asphalt, Leim usw. zu den verschiedenartigsten Zwecken, zum Isolieren, Imprägnieren, Wasser- oder Fettdichtmachen, zum Kleben, Abdichten, Färben, Ausfüllen, Überziehen usw. zu verwenden. Die „Cellon"-Lacke werden infolgedessen nicht nur in den mannigfachsten Industriezweigen, wie der Metallindustrie, Textilindustrie, Holzindustrie, in der Elektrotechnik usw. angewendet, sondern auch in ein und demselben Betriebe zu den verschiedenartigsten Zwecken. Ein typisches Beispiel hierfür gibt der Direktor der Elektrizitätswerke und Straßenbahn Tilsit, Herr F. Auerbach, in einem Artikel über die Verwendung der „Cellon"-Lacke im Straßenbahnbetrieb. Er sagt über Anwendungsgebiete nur für Straßenbahnzwecke folgendes:

Digitized by Google

„Cellon"-Lacke werden angewandt für:

1. Tränkung der Ankerspulen und Herstellung einer Schutzschicht auf den Spulenwickelungen und als ölfester Überzug für die oft mit Öl bedeckten Unter- und Feldspulen,

2. Tauchen der Anker,

3. Reparatur an Feldspulen und Tauchen derselben,

4. isolierenden Schutzanstrich der Ankerkappen bzw. Wickelköpfe gegen Einwirkung von Feuchtigkeit, Schmutz usw. und mechanische Verletzungen,

5. Isolierung der Stirnseiten der Kollektoren und Bürstenbrücken, insbesondere Schutz gegen das Eindringen von Metallstaub,

6. Isolationsanstrich der Fahrschalterwalzen, Reparaturen an den Fahrschaltern,

7. Anstrich von Bindfadenbandagen,

8. farbige, ölfeste Isolierung mit blauen, roten oder gelben Cellonlacken, welche durch das Öl nicht verschmutzt und unkenntlich gemacht werden,

9. biegsame Isolation beweglicher Kabel, insbesondere Imprägnierung der Wagenkabelleitungen,

10. Rostschutzlack für eiserne Freileitungen,

11. Schutz der Plakataushänge in den Bahnhöfen und in den Wagen mit Cellonpapierlack gegen Regen und Beschmutzung durch Anfassen,

12. Aufkitten der Buchstaben und Zahlen in den Laternen auf die Glasscheiben mit Cellonkitt,

13. als farbige, lichtechte Lacke für die Scheiben oder Glühlampen der Wagenlaternen, weißer Lack zum teilweisen Abblenden der Lampen für die Fahrer, blaue oder grüne Abdeckung der Scheiben des Vorderperrons,

14. regensichere Abdichtung der Wagendächer von Straßenbahnwagen und Reparatur der Wagendächer mit Hilfe des sehr fest haftenden und die Leinenstreifen fast unlöslich miteinander verbindenden, wasserfesten, aber stets geschmeidig bleibenden Cellonkittes; gegebenenfalls unter nachträglichem Überstreichen des ganzen Wagendaches mit einem weißen oder andersfarbigen „Cellondecklack".

Es wirft sich nun die Frage auf: Wie kommt es, daß bei den Vorzügen der „Cellon"-Lacke und bei den wertvollen Eigenschaften der „Cellon"-Schichten, ihrem hohen Isolationswert, ihrer Wasserfestigkeit, ihrer Unangreifbarkeit durch Öle, Fette, Spiritus, Benzin, Benzol, Terpentin, verdünnte Säuren und Alkalien, Gase und Dämpfe aller Art, ihre Einführung in die Technik so langsam vonstatten gegangen ist? Die Gründe hierfür sind sehr verschieden. Einer der wesentlichsten ist, wie schon erwähnt, das Vorurteil, welches vor etwa 20 Jahren durch den Mißerfolg des Acetatdrahtes erzeugt worden ist, und das

Digitized by Google

man in Fachkreisen auch dann noch der Azetylzellulose gegenüber beibehielt, als es gelungen war, in der azetonlöslichen Azetylzellulose ein absolut stabiles und durchaus brauchbares Präparat zu schaffen. Viele Firmen halten sich auch heute noch, aus Furcht vor der Essigsäureabspaltung, den „Cellon"-Lacken gegenüber ablehnend und bezeichnen dieselben als grünspanbildend, während sie tatsächlich grünspanverhindernd wirken.

Ein anderer Grund ist die bekannte Tatsache, daß sich insbesondere die Arbeiter und Meister gegen eine grundlegende Änderung in dem Betriebe sträuben und insbesondere bei Präparaten, welche sich prinzipiell von den gewohnten unterscheiden.

Ein dritter und sehr wesentlicher Grund besteht in ungünstigen Urteilen, die über die Erfahrungen mit „Cellon"-Lacken gefällt und verbreitet worden sind. Diese Mißerfolge sind fast ausschließlich, wie in einer großen Anzahl von Fällen durch genaue Untersuchung der Begleitumstände festgestellt werden konnte, auf unrichtige Anwendungsweise der „Cellon"-Lacke und auf Nichtbeachtung ihrer besonderen Eigenschaften zurückzuführen. Die besonderen Eigenschaften der „Cellon"-Lacke bestehen vor allem darin, daß sie sich mit verschiedenen anderen Agenzien nicht vertragen, infolgedessen mit denselben auch nicht vermischt oder auf dieselben nicht aufgestrichen werden dürfen. Wie bereits erwähnt, sind die „Cellon"-Schichten absolut ölfest. Sie werden selbst durch heißes Öl oder Fett, sei es nun Leinöl, Paraffin, Wachs, Terpentinöl oder Petroleum, nicht angegriffen. Dadurch resultiert aber umgekehrt, daß die „Cellon"-Schichten sich mit Öl nicht vertragen und auf ölhaltigem Untergrund nicht haften. Es ist deshalb in den Gebrauchsanweisungen für „Cellon"-Lacke vorgeschrieben, daß die zu cellonierenden Maschinen oder Leitungsteile möglichst durch Abreiben mit Benzin oder Benzol oder auch mit dem „Cellon"-Lack selbst von frischem Öl oder Fett befreit werden sollen, ehe man lackiert oder imprägniert, und daß da, wo „Cellon"-Lacke auf alte getrocknete Ölisolationen aufgetragen werden sollen, zweckmäßig erst eine Schicht von „Cellon"-Grundierlack aufgestrichen wird, welche auf der trockenen Ölschicht gut haftet, und auf welche man dann den eigentlichen „Cellon"-Isolierlack aufstreicht. Auf frisch geöltem oder paraffiniertem Untergrund aber haftet die „Cellon"-Schicht nicht, ja in vielen Fällen trocknet sie auf demselben überhaupt nicht auf. Streicht man beispielsweise auf einen Blechstreifen, dessen eine Hälfte man mit Paraffin abgerieben hat, einen „Cellon"-Isolierlack in dünner Schicht, so trocknet derselbe an der nicht paraffinierten Seite in 10 Minuten, so daß man dann schon einen zusammenhängenden klaren Film abziehen kann, während auf der paraffinierten Seite sich eine weiche, klebrige Masse bildet, welche 2 bis 3 Tage zum Trocknen braucht,

Digitized by Google

also ganz andere Eigenschaften zeigt, wie sie die „Cellon"-Schicht besitzen soll.

Trotz des Hinweises auf diese Eigentümlichkeit und das unbedingte Erfordernis der Vermeidung einer Paraffinierung und trotz der entsprechenden kategorischen Anordnungen der Betriebsingenieure haben sich, wie festgestellt werden konnte, vielfach Meister und Arbeiter nicht entschließen können, der Gewohnheit, die umsponnenen Drähte vor dem Einziehen in die Nuten zu paraffinieren, zu entsagen. Die

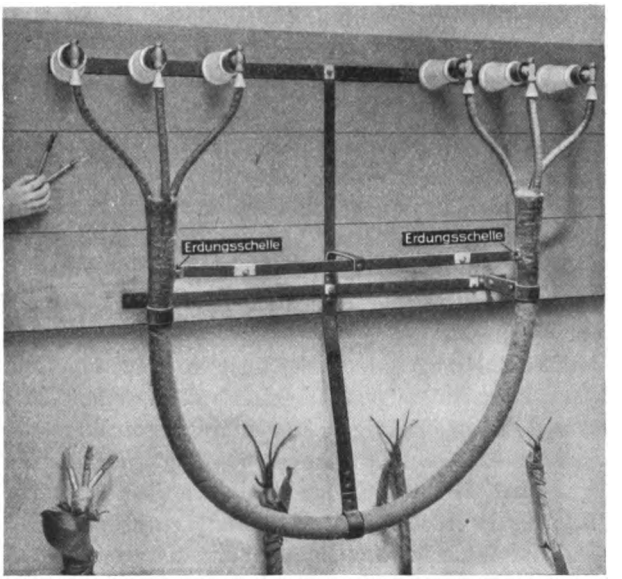


Abb. 11. Hochspannungskabelendverschluß nach Monath. Zum Vergleich diverse Kabelenden, sämtlich mit isolierendem Cellonkitt und Cellonschutzlack wasserdicht verschlossen.

Folge war dann naturgemäß ein ungenügendes Trocknen des „Cellon"-Lackes und eine ungenügende Isolierung. Gerade auf die Nichtbeachtung dieser Vorschriften sind die hauptsächlichsten Mißerfolge der „Cellon"-Lacke in der ersten Zeit zurückzuführen, und es konnte in manchen Fällen festgestellt werden, daß die „Cellon"-Lacke in Gefäßen verarbeitet wurden, welche noch große Reste Öllacke enthielten, daß sie mit Öllacken direkt vermischt, daß sie mit ölgetränkten Pinseln gestrichen wurden usw. Außer mit Ölen und Fetten vertragen sich aber die „Cellon"-Lacke auch mit einer ganzen Reihe anderer, in der Elektrotechnik gebrauchter Substanzen, nicht. Schellack, Harze, Asphalt wirken auf die „Cellon"-Schichten erweichend und die Trocknung verhindernd ein. Andererseits lösen die „Cellon"-Lacke die Harz-

Digitized by Google

und Asphaltschichten auf, so daß es zwecklos und schädlich ist, zuerst eine Schellack- oder Asphaltisolierung aufzubringen und dann zu cellonieren. Hierdurch sind die Isolation verschlechtert statt verbessert. Ein weiterer Arbeitsfehler lag vielfach in dem Auftrag von den „Cellon"-Schichten auf einen Untergrund, auf welchem dieselben nicht haften, wie beispielsweise Gummi, Guttapercha, Leim und andere Eiweißkörper, sowie auf sehr harte und glatte Oberflächen von Metall, Holz, Marmor, Vulkanfiber usw. Auf den ersteren haften „Cellon"-Schichten überhaupt nicht, auf den letzteren haften die harten „Cellon"-Isolierlacke nicht genügend und muß deshalb stets eine Zwischenschicht von „Cellon"-Grundierlack angebracht werden, welche dann die Bindung zwischen dem blanken Metall und der Isolierschicht bewirkt.

In der Wahl unrichtiger „Cellon"-Lacksorten, bzw. der Nichtbefolgung der Vorschriften, über die jeweilige Anwendung eines harten oder weichen, eines Grundier- oder eines Überzugslackes, in der Verwendung eines Tauchlackes zum Streichen, eines Streichlackes zum Spritzen, eines Spritzlackes zum Imprägnieren, in der Verwendung eines Isolierlackes für Leder, eines Holzlackes für Gewebe usw. liegen weitere Fehlerquellen, welche zu manchen Schwierigkeiten Anlaß gegeben haben.

Diese Vorkommnisse gehören allerdings in der Hauptsache der Vergangenheit an, man hat allgemein gelernt die „Cellon"-Lacke richtig anzuwenden und mit der richtigen Anwendung ihren Wert zu erkennen. Speziell in der Elektrotechnik haben sie nicht nur dadurch Bedeutung erlangt, daß sie viele bisher benutzte Isoliermaterialien, insbesondere solche, deren Qualität sehr häufig zu wünschen übrig ließ, infolge ihrer zuverlässigen Gleichmäßigkeit und Reinheit vorgezogen wurden, sondern auch dadurch, daß sie sehr vielfach altgewohnte und bewährte Isoliermaterialien, wie Schellack, Gummi, Seide, vollkommen verdrängt haben, da sie für die betreffenden Spezialzwecke sich infolge ihrer besonderen Eigenschaften besser bewährten.

Die „Cellon"-Lacke dürften sich infolgedessen sich einen dauernden Platz als Isoliermaterial errungen haben.

Digitized by Google

VIII. Das Mineralöl.

Sein Vorkommen, seine Gewinnung, Verarbeitung und Verwendung unter besonderer Berücksichtigung der elektrischen Industrie.

Von **F. Frank.**

1. Begriffsbestimmung.

Mineralöl ist die Bezeichnung für eine Gruppe von Körpern, die in der Hauptsache in der Form von Ölen in der Natur vorkommen unter der Begriffsbezeichnung: Erdöle oder Steinöl, und von Ölen, die sekundär aus Mineralien bzw. aus fossilen Grundstoffen durch pyrogene Reaktionen hergestellt werden. Die letztere Klasse umfaßt in erster Linie die aus den Ölteeren gewonnenen Öle und hier wieder in erster Linie die Stoffe, die aus Braunkohlenteer und aus Schieferteer gewonnen werden. Prinzipiell nicht als Mineralöle werden diejenigen Stoffe bezeichnet, die in ölartiger Form aus Steinkohlenteer, Holzteer usw. gewonnen werden.

2. Entstehung.

Die Entstehung der Erdöle ist nach der heute am meisten verbreiteten und bewiesenen Anschauung darauf zurückzuführen, daß Reste von Seetieren und Seepflanzen und überhaupt Reste von Lebewesen jeder Art aus den in denselben enthaltenenen Fettstoffen unter gewissen Aufspaltbedingungen die Erdölprodukte entstehen ließen. Es ist gelungen, diesen in der Erde langjährigen Prozeß künstlich vollkommen nachzuahmen und so den Beweis für die Theorie zu erbringen. Auch alle übrigen Bestandteile der Fette aus der Flora und Fauna, wie Schwefel und Stickstoff aus den Eiweißverbindungen sind in den Erdölen vorhanden. Ganz besonders beweislich für diese Art der Entstehung ist der Nachweis der optischen Aktivität der Erdöle. Hier kann natürlich auf Einzelheiten nicht eingegangen werden und es kann nur verwiesen werden auf die nach diesseitiger Anschauung sehr beweiskräftigen Arbeiten von Walden, Marcusson, Neuberg, nach denen die Aktivität des Erdöls durch den Gehalt desselben an Spaltungsprodukten von Proteinstoffen verursacht sein müssen. Andere Theorien kommen zum Teil auf anderen Wegen zu ähnlichen Ergebnissen. Ich verweise auf die klassischen experimentellen Arbeiten

Digitized by Google

von Engler, Krämer und Spilker als führende, und auf die Arbeiten von Potonié als theoretische. Erwähnt werden müssen natürlich auch die rein anorganischen Hypothesen, die vor allen Dingen Sabatier und Senderens, sowie Mendelejeff vertreten haben. Diese Theorien gründen sich darauf, daß die Metallkarbide, die durch vulkanische Prozesse im Erdinnern entstanden sein können, durch Wasserdampf zu Kohlenwasserstoffen zersetzt worden seien. Diese, die sogenannte Emanationstheorie dürfte aber am wenigsten heute noch als berechtigt anerkennbar sein. Hier mag erwähnt sein, daß die Theorie, die besonders Krämer und Engler beweislich experimentell dargetan, noch heute in den Industrien eine gewisse Nachahmung in der Ausnutzung der fossilen Fettreste hat. Hierfür diene als Beispiel charakteristischer Art das Vorhandensein des sogenannten Montanwachses, eines ganz richtigen und normalen Pflanzenwachses aus

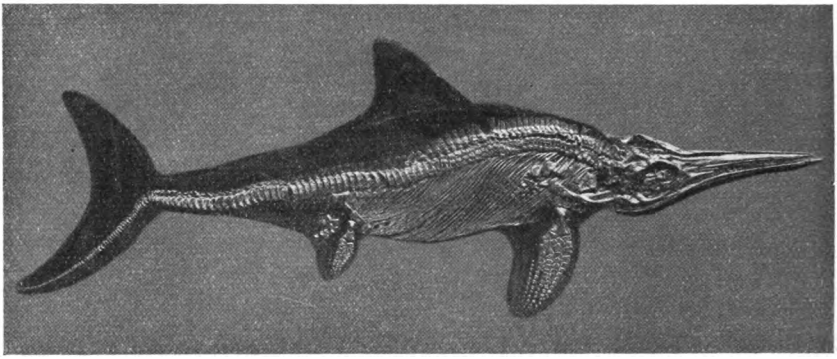


Abb. 1. Ichthyosaurus quadriscissus Qu. 2 m langes Tier mit vollständiger Hautbekleidung, Posidonienschiefer Holzmaden (Württbg.). (Original Universitätsmuseum Oxford.)

den Braunkohlenbildnern in den Kohlen. Es liefert dieses als Ausgangsmaterial, heute in erster Linie die öligen Stoffe und das Paraffin, die sogenannten Mineralöle bei der Braunkohlenentgasung (Schwelung) und Vergasung. Die Berechtigung, die Kohlenöle aus den Teeren der Braunkohlen und Schiefer als Mineralöle usw. zu bezeichnen, ist daher gegeben. Im Schiefer liegen analoge Verhältnisse wie bei der Braunkohle vor. Ich exemplifiziere auf die sogenannten Belemniten-Schlachtfelder, wie sie im Jura mit tausenden von Tierresten in einem Steinstück, welches man bequem in die Hand nehmen kann, zu finden sind. Ich verweise weiter auf die allbekannten Reste der Saurier, der Pentacrinen usw., die sich in schön erhaltenen Skeletten in den Schieferbrüchen (Abb. 1) finden. Es dürfte ohne weiteres verständlich sein, daß das bituminöse Material, welches in diesen Schiefern

Digitized by Google

enthalten ist, auf die Inhaltssubstanzen dieser Tierarten zurückführbar sein muß, soweit es an primärer Lagerstatt verbleiben konnte. Zum größten Teil rührt jedoch das Bitumen in den Posidonienschiefern von Kleinorganismen des Plankton her, ich verweise auf die Arbeiten von Potonie, Pompeaky, Hauff.

Ich möchte nun für die Weiterbehandlung zunächst mich auf denjenigen Stoff beschränken, der zu den wertvollen Schmier-, Brenn- und Leuchtstoffen führt. Es ist dies das Erdöl mit den aus ihm gewonnenen Stoffen. Nur wo es unumgänglich nötig ist, werde ich auf die Mineralöle, die sekundär aus fossilen Brennstoffen mit unseren jetzigen Hilfsmitteln fabrikmäßig erzeugt werden, eingehen.

3. Gewinnung.

Erdöle sind, solange wir die Geschichte der Menschheit verfolgen können, bekannt. Sie dienten, da wo sie in Ausbissen zu Tage traten, zu irgendwelchen Heilzwecken oder zur Vortäuschung irgendwelcher, für die Mehrheit des Volkes unverständlicher Naturkräfte in den heiligen Feuern (Erdgasbrände) usw. Sie dienten da, wo sich die Stoffe stark eingedickt und asphalt- oder pechigen Charakter angenommen hatten, zu Bauzwecken als ein außerordlich hochwertiges und widerstandsfähiges Mörtelmaterial. In fast allen Teilen der Erde sind Vorkommen von Erdölen und erdölartigen Stoffen beobachtet worden. Einen wirklichen Aufschwung nahm jedoch die Gewinnung erst als die gewaltigen Vorkommen in Nordamerika bekannt wurden. Hier ist es das Jahr 1855, in dem Prof. Silliman vom Yale College an Ercleth, Bissel und Reed sein Gutachten erstatte, in dem die absoluteste Sachlichkeit diesen Forscher die ganze technische Entwicklung voraussehen und erkennen ließ. Hier liegt eindeutig erkenntlich die Basis der Entwickelung der weltumfassenden Erdöl-Industrie. In Bezug auf die Menge der Erzeugnisse war das Vorkommen im Bakuer Revier lange Zeit hindurch das zweitgrößte. Viel später folgten die Bohrungen in Galizien, dann Rumänien, Mexiko und nun Persien, Argentinien, Palästina usw. Etwa gleichzeitig mit den galizischen Aufschlüssen liegen die ersten Versuche in der Lüneburger Heide, Öle zu erbohren. Ich selbst habe mein Interesse am Erdöl aus dieser Zeit und konnte noch die Beziehungen mit all den Männern, die damals arbeiteten, aufrecht erhalten. Gern denke ich an den alten Bergheim, der mit dem Kanadier Mac Garvey das kanadische Bohrverfahren mit dem für unsere Verhältnisse unmöglichen Spülverfahren in der heimischen Sandbüchse anzuwenden suchte. Das schöne Lied von Ölheim wurde damals in allen Gassen gesungen. Mit dem letzten Bohrgestänge, was noch aus dem Sand der Heide herauszuziehen war, gingen die genannten Männer in die Karpathen, und dort entstand

Digitized by Google

dann auf Grund der Garveyschen Bohrungen im Gestein, wo die Spülung am Platze war, die galizische Karpathen-Gesellschaft mit ihren mächtigen eruptiven Sonden. Noch neueren Ursprunges sind die Auffindungen der Lagerstätten in Mexiko und die im indischen Archipel, die heute besonders in Bezug auf die Qualität der leichteren Öle mit den Amerikanern in starkem Wettbewerb liegen. Überhaupt ist das Erdöl ein trauriger und wichtiger Zankapfel in der Weltpolitik geworden und dürfte es auch in absehbarer Zeit noch bleiben. Ich will hierauf nicht weiter eingehen und gebe hierüber nur kurz eine Übersicht über die Weltproduktion.

Welterzeugung an Erdöl nach Meißner
(Zeitschr. f. prakt. Geol. XXX, Heft 4).

Land	1910 in 1000 t	1913 in 1000 t	1916 in 1000 t	1918 in 1000 t	1920 in 1000 t
Rußland	9378	9247	9933	5520	3483
Rumänien	1352	1885	1432	1214	1034
Galizien	1763	1088	927	679	765
Italien	7	7	7	7	5
Deutschland	145	121	93	90	35
Elsaß (bis 18 Deutschland enth.)	—	—	—	—	54
England	310	290	247	243	522
Europa zusammen	13000	12700	12600	6800	5600
Vereinigte Staaten	27941	33126	40102	47457	62188
Mexiko	519	3671	5792	9118	24410
Kanada	45	33	38	44	28
Argentinien	3	19	124	178	242
Trinidad	—	71	130	292	281
Peru	190	305	490	350	373
Venezuela	—	—	10	51	70
Amerika zusammen	28700	37200	46700	57500	87600
Niederländisch Indien	1496	1534	1730	1707	2512
Britisch Indien	859	1107	1189	1146	1000
Japan	247	277	428	345	285
Persien	—	250	588	1131	1685
Asien zusammen	2600	3100	3900	4300	5500
Ägypten	—	13	55	273	156
Weltförderung	44300	53000	63300	68900	98900

(Diese Daten haben sich im Jahre 1922 erfreulicherweise zu Gunsten der heimischen Wirtschaft durch neue Funde erheblich verbessert.)

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über den Verbrauch der verschiedenen Ölarten in Deutschland.

Digitized by Google

Verhältniszahlen der einzelnen Ölarten zum Gesamtjahresverbrauch der Privatindustrie.

Rohes Erdöl	1744 t	0,7 %
Zylinderöle	40750 t	14,0 %
Maschinenöl (mineral)	50702 t	22,0 %
Teerfettöle	40000 t	17,0 %
Wagen- und Achsenöle ohne Teerfettöl	20430 t	8,7 %
Wasserlösliche Öle	10474 t	4,5 %
Rübölersatz und Putzöle	17224 t	7,0 %
Konsistente Fette	35762 t	15,5 %
Verschiedene, nicht definierte Öle	16490 t	7,0 %
	233576 t	100,0 %

4. Die Gewinnung des rohen Erdöles.

Der alte erste Betrieb war ein Schöpfbetrieb, der sich aus tiefliegenden Gruben oder aus aufgegrabenen Löchern in einfachster Weise vollzog. Zum Teil sind ähnliche Gewinnungsarten noch heute im Boryslawer Gebiet für Erdwachsgewinnung vorhanden. Der Bergmann wird an einem Seil heruntergelassen und schöpft das anquellende Öl oder bricht das Erdwachs. Er ist dabei von den Wettern arg bedroht und es passiert noch immer Unheil genug.

Da die großen Lagerstätten sich meist sehr tief in Spalten und Klüften im Erdinnern befinden, wo sie durch undurchlässige Erdschichten oder Gesteine eingeschlossen sind, so war es erforderlich, durch den Tiefbohrbetrieb an die Vorkommen heranzugehen. Zunächst wurde viele Jahre hindurch bis etwa 1914 der reine Bohrbetrieb unterhalten. Erst von diesem Zeitpunkt ab finden wir auch einen Schachtbau. Der erste Schacht wurde durch die Energie Nöllenburgs und Middendorfs nach einem besonderen Verfahren von der Deutschen Erdöl-Aktiengesellschaft im Elsaßer Revier abgeteuft. Hier ist ein Meisterwerk deutscher Technik vollbracht und die fremden Völker, die sich mit Begeisterung auf Deutschlands Besitz stürzen, haben auch diesen Fortschritt begriffen und sich desselben wenigstens bei dem Aufschluß, den sie jetzt in deutschen Revieren nach deutschen Erdölen vornehmen, bedient. Es scheint hier nicht der Ort um näher auf diese nicht uninteressanten Dinge eingehen zu können. Jedenfalls wird der Schachtbau besonders für die Aufwältigung von ölführenden Sanden eine große Bedeutung gewinnen und behalten.

Beim Bohrbetrieb wurde fast immer die Eruption des unter hohem Druck in der tiefen Lagerstätte ruhenden Schatzes für die erste Förderung ausgenutzt. Sobald die Eruption aufgehört hatte, wurde dann in die vollkommen verrohrte Bohrung der Pumpbetrieb in Gang gebracht, der an vielen Stellen dann das Vorkommen soweit ausnutzt, wie dies mit den heutigen Hilfsmitteln möglich ist.

Digitized by Google

An anderen Stellen wieder, wie z. B. in der Lüneburger Heide, ist vielfach das Öl mit Schlemmsand gemischt und führt so zu den schwierigsten Aufschlüssen, weil die Rohrtouren im nicht festen Gestein von den sich bewegenden Sandmassen häufig eingedrückt werden. Sie werden auch zur Seite gedrängt und reißen ab. Wo die Bohrung aber fest steht, kann man dann auch nicht durch bloßen Pumpbetrieb die Ölschlammassen heraufbefördern. Aus diesem Grunde werden Schlammbüchsen eingesenkt, die durch ihre Schwere allmählich in den Ölsand eindringen, sich damit füllen und dann gefüllt an die Oberfläche gefördert werden. Dann werden die Büchsen geöffnet und zunächst, bisher grobmechanisch, das Öl vom Schlamm getrennt. Auf diese Weise gehen natürlich noch große Mengen Öl bis heute verloren und eine sehr intensive Arbeit hat eingesetzt, um diese heimischen Bodenschätze noch zugute zu bringen. Hier kann auch die Arbeit des Elektrotechnikers noch vieles leisten, sowohl für den Pumpbetrieb, den Bohrbetrieb, die Freilegung von durch irgendwelche Zufälle vernagelten Bohrlöchern und vielleicht auch nicht zum mindesten bei den Versuchen zur Gewinnung des im Sandschlamm verbleibenden Öles.

Die Bewegung der geförderten Ölmassen vom Gewinnungsplatz zur Verarbeitungsstelle ist weiter eine außerordentlich wichtige Frage. Sie geschieht an den Großarbeitsstellen heute fast ausschließlich durch Rohrleitungen, die vielfach frei, in der Hauptsache aber vor irgendwelchen äußeren Angriffen geschützt, gut untererdig verlegt werden. Auf diese Rohrleitungen, die in langen Zügen die Gebiete der amerikanischen Ölzonen durchqueren, die in Rumänien während der Besetzung von unseren Truppen bewacht wurden und auch in den anderen Gebieten den Transport der rohen und reinen Öle beherrschen, kann nicht weiter eingegangen werden.

5. Verarbeitung.

Die Verarbeitung geschieht meist in Fabriken von gewaltigem Umfange. Das Rohöl wird in Kesseln liegender oder stehender Bauart zur Destillation gebracht; dadurch soll es in die Inhaltsstoffe zerlegt werden, ohne daß dabei tiefergehende Veränderungen in dem Material selber vorgenommen werden. Die Destillation ist also nur eine trennende Zerlegung in die einzelnen im Ausgangsmaterial vorhandenen Teile. Zuerst geht bei niedrigen Temperaturen der leicht siedenste Anteil, nämlich das sogenannte Benzin in Dampfform über und wird durch Wiederverdichtung, d. h. Kühlung, wieder verflüssigt. Den Benzinen folgt das Leuchtöl oder Petroleum. Diesem das Gasöl (Treiböl, Kolzaöl, Putzöl, Paraffinol, Kühlöl und wie die Namen alle heißen) und nun kommen je nach der Art der Rohstoffe die verschiedenen Schmieröle, nämlich Spindelöl, leichtes und schweres Ma-

Digitized by Google

schinenöl, Naßdampf- und Heißdampfzylinderöl. Die erste Gruppe einschließlich des Petroleums wird überall, wo rohes Erdöl gefördert wird, möglichst schon in größter Nähe der Gewinnungsstätten gewonnen, um den Weitertransport der Rückstandsöle zu erleichtern. Es ist dies deswegen erwünscht, weil die leichten Anteile eben besondere Vorsicht beim Transport bedingen. Die großen Arbeitsstätten, die aber heute im allgemeinen die Verarbeitung vornehmen, sind meist so eingerichtet, daß sie im kontinuierlichen Gange die Rohöle soweit zu verarbeiten vermögen, wie dies für die einzelne Art, die zur Verarbeitung steht, sachgemäß ist. Die letzten Anteile, nämlich die Zylinderöle, werden auf verschiedenartige Weise gewonnen, nämlich vielfach als Rückstandsöle oder sogenannten Konzentrate. Dies ist aber nur möglich bei denjenigen Rohölen, die an sich rein sind und so direkt konzentriert werden können auf bestimmte Eigenschaften für bestimmte Verwendungszwecke. Die hochwertigen Öle müssen jedoch alle einer Destillation unterworfen werden und werden erst nach derselben durch Konzentration oder Zerlegung zu besonderen Qualitäten aufgearbeitet. Die Destillation selbst wird, wo gut gearbeitet wird, so schonend wie möglich durchgeführt, um Zersetzungen weitgehendst zu vermeiden. Man verwendet deshalb zur Destillation eine möglichst hohe Luftverdünnung und setzt außerdem noch, um Überhitzungen von den direkt beheizten Kesselwandungen und dadurch eingeleitete sekundäre Zersetzungen zu vermeiden, Wasserdampf zu. Dieser soll möglichst weitgehend überhitzt sein und so in die Destillationsgefäße eingeleitet werden, daß er die direkt dem Feuer ausgesetzten Flächen der Destillationsgefäße dauernd bestrahlt und gewissermaßen so eine Dampfschicht zwischen dem kochenden Öl und der heißen Kesselwand als Schutzkissen einschaltet und als Vehikel für die trägen Öldämpfe dient oder richtiger gesagt, den Hauptteil des durch die Öldämpfe zu überwindenden Luftdruckes aufnimmt.

Die leichtesten Destillationsteile, die Benzine, wurden bis vor gar nicht langer Zeit zum Teil noch als sehr üble Beigaben empfunden und es war nichts Ungewöhnliches, daß man sich ihrer durch glattes Verbrennen zu entledigen suchte. Heute sind sie, wie jedem bekannt ist, besonders hochwertige Stoffe, weil sie die günstigen Triebstoffe für alle Explosionsmotoren darstellen. Welche Bedeutung daher die Benzine als solche erlangt haben, braucht hier nicht besonders ausgeführt zu werden. Es sei aber gesagt, daß sie eine Reihe von Verbindungen chemischer Art darstellen, die in der Hauptsache der sogenannten Paraffinreihe angehören, also auf den Grundstoff Methan als dessen Homologe aufbauen. Neben den Paraffinkohlenwasserstoffen sind auch ungesättigte olefinische Körperklassen vertreten. Unter diesen letzten mag hier die Körperklasse der Butadiene genannt sein,

Digitized by Google

die ja für die künstliche Herstellung des Kautschuks (besonders für Akkulumatorenkasten) eine beachtliche Rolle zu spielen bestimmt schienen. Hier waren die chemischen Arbeiten bisher nicht imstande, dem lieben Gott Konkurrenz zu machen. Er hat inzwischen die Kautschukbäume in den uns enteigneten Kolonien und in den besseren Kolonien, die die Engländer und Holländer schon vorher sich ausgesucht hatten, so wunderbar gedeihen lassen, daß kaum die Möglichkeit an eine Überflügelung durch künstliche Produkte geblieben ist. Aber andererseits enthalten die Benzine auch noch Naphtene, besonders in Holl. Indien, und in Galizien Kohlenwasserstoffe der Benzolreihe, und man hat es auch unternommen, diese Stoffe aus den Benzinen während der Kriegszeit nach dem schönen Edeleanu-Verfahren durch flüssige schweflige Säure zu gewinnen. Ob diese Gewinnungen auch weiterhin Zweck haben und irgendwie von Bedeutung bleiben oder werden können, das möchte ich nicht diskutieren, da ja heute die Sache eigentlich so aussieht, als ob die Benzinvorräte der Welt den normalen Verwendungsbedarf nur eben zu decken vermögen. Es ist daher vielmehr das Bestreben wahrzunehmen, aus den Rohstoffen mehr benzinartige Stoffe durch besondere chemische Arbeit zu gewinnen oder direkt solche Benzine und benzinartigen Stoffe künstlich herzustellen. Zu diesem Zwecke hat sich in Amerika in ausgedehntem Maßstabe die Krackdestillation als ein zwar brutales aber doch wirtschaftliches Hilfsmittel herausgebildet. In Deutschland ist der für uns sterilere Boden mit feineren Hilfsmitteln angefaßt. Die Ergebnisse sind die genialen Hydrierungsverfahren von Bergius und etwas später die von Melamid.

Dem normalen und guten Treibölbenzin folgt das Schwerbenzin, welches in ganz bestimmten Fraktionsanteilen als Lösebenzin oder Lackbenzin das sogenannte Testbenzin darstellt. Alle Benzinarten werden je nach der beabsichtigten Verwendung im Rohzustand oder im mehr oder weniger gereinigten Zustand verwendet. Die Reinigung geschieht in brutalster Weise dadurch, daß die störenden Stoffe durch Schwefelsäure zerstört werden und so zur Ausscheidung kommen als eine beachtliche Menge eines wertlosen Ballastes. Eine weit feinere und wirtschaftlichere Arbeit, wird z. B. durch Verfahrensarten wie die von Edeleanu (vgl. oben) ausgeführt, bei denen z. B. durch flüssige schweflige Säure die Zerlegung in Gruppen verschiedener Verwendbarkeit erfolgt. Bei diesem Verfahren sind natürlich Materialverluste so gut wie nicht vorhanden.

In gleicher Weise wie die Benzine aus verschiedenen Reihen von chemischen Individuen bestehen, setzen sich diese Reihen in ihren Homologen auch durch die höher siedenden Anteile fort. Wir finden sie also wieder in den Leuchtölen und Schmierölen. Wir finden da-

Digitized by Google

her auch die gleichen Reinigungsverfahren in den verschiedenen Anwendungsformen. Die Reinigungsarten heißen, wie sie auch angewendet werden, Raffination.

6. Raffination.

Die Raffination ist erforderlich in erster Linie bei den Leuchtölen, um ein rußfreies Verbrennen zu erzeugen und um eine Harzabscheidung und Verkrustung am Docht sicher zu vermeiden. Verkrustungen, Harzabscheidungen, nachträgliche Verdickungen usw. sind es auch, die zur Raffination der Schmieröle und überhaupt der weiterfolgenden Trennstücke, unter die auch das bisher noch nicht erwähnte, Ihnen allen bekannte Vaselin und Paraffin gehört, zwingen. Es muß noch eine Körperklasse erwähnt werden, die sich wie ein Kernfaden durch das gesamte Trennstückgebiet zieht. Es sind dies die Naphtensäuren[1]), die noch wenig bearbeitet wurden, aber sich dafür um so störender geltend machen. Sie haben z. B. die außerordentlich unangenehme Eigenschaft, die meisten Metalle, vor allen Dingen auch Blei, in sehr beachtlichen Maßstabe zu lösen. Aus diesem Grunde greifen dann auch die rohen Destillate verschiedener Provenienz die Rohrleitungen und die Lagergefäße stark an und geben dann bei der weiteren Verwendung dadurch, daß nunmehr Metallsalze in denselben gelöst sind, zu den mannigfaltigsten Schwierigkeiten Anlaß, auf die später noch einzugehen sein wird.

7. Filtration.

Die Öle selbst werden nach der Raffination noch filtriert. Einige Rohprodukte liefern so reine Destillate, daß es genügt, diesselben überhaupt nur zu filtrieren, um mechanische Verunreinigungen zu entfernen. Die Filtration wird ausgeführt durch gewöhnliche Filtertücher, durch Filtrierpapier, neuerdings durch Kolloidmembrane und endlich und wichtigstens durch Filtererde, die wir zuerst als Floridaerde kennengelernt haben. Diese Erde ist ein Aluminiummagnesiumhydrosilikat, welches beim Glühen und Wiederabkühlen Sauerstoff okklodiert und dann später neben der großen Oberflächenwirkung in gleicher Weise zur Wirkung kommen läßt, wie dies bei Holzkohle der Fall ist. Die Filtererde wird in das warme Öl eingemischt. Diese Mischung wird dann in gewöhnlicher Weise durch Filterpressen gepumpt oder das Öl wird von oben nach unten oder unten nach oben durch die gepackte Erde hindurchgepreßt oder hindurchsickern lassen.

Es erscheint noch wichtig, auf ein Moment hinzuweisen, welches bei der Raffination der Öle von größter Bedeutung ist. Es bilden

[1]) Budowski, Naphtensäuren. Berlin, Julius Springer, 1922.

Digitized by Google

sich nämlich bei der Behandlung mit Säure Verbindungen derselben auch mit Kohlenwasserstoffen. Diese Produkte werden Sulfosäuren genannt und sind im Öl löslich. Sie führen bei der Weiterbehandlung mit Wasser und Lauge dazu, milchige Emulsionen zu bilden, die häufig auch die erfahrendste Kunst des wirklichen Raffineurs nicht zu beseitigen vermag, wenn sie einmal durch eine ungeschickte Hand angerichtet worden sind. Dies wäre aber nicht das Schlimmste bei der Sache, sondern für die Verwendung der fertigen Öle ist es von ausschlaggebender Bedeutung, daß bei der folgenden Behandlung mit Alkalien aus diesen Sulfosäuren Salze entstehen, die ihrerseits wiederum zum kleinen Teil im Öl gelöst bleiben und nun z. B. bei der Verwendung in der Turbine, um nur eins zu erwähnen, zu Emulsionen führen können, die Schaum geben und die Abscheidung des Wassers aus dem Öl bei der Umlaufschmierung verhindern und dadurch zu sehr beachtlichen Schwierigkeiten im Werk führen können. Im Transformator können sie sich auch zersetzen und sekundär dann unangenehme Störungen verursachen.

Die hochsiedensten Öle, die den größten Körper haben, also ungefähr das, was man als Viskosität bezeichnet, können natürlich nur sehr schwer und unwirtschaftlich mit Säure raffiniert werden, weil die Schlußreinigung eine zu schwierige ist. Es sind dies die Zylinderöle, die in fast allen Fällen nur Filtrate, oder wie es so schön in der Ölsprache heißt „Filtered Oils", sind.

8. Verwendung.

Auf die Verarbeitung kann hier nicht weiter im einzelnen eingegangen werden. Erwähnt sei noch, daß die Stoffe den Verwendungszwecken angepaßt werden müssen. Hierzu ist es beispielsweise unerläßlich, daß die Destillate, bevor sie zur Raffination kommen, auf eine gewisse Kältebeständigkeit gebracht werden. Die festen Paraffine sind es, also die höheren Homologen des Methans, die in erster Linie das Erstarren der Ölanteile bewirken. Sie müssen daher überall dort entfernt werden, wo es sich um Fertigstoffe handelt, die für solche Anwendungsstellen bestimmt sind, bei denen niedrigere Temperaturen vorhanden sein können. Aber auch noch ein anderes Moment ist nach dieser Richtung hin wichtig, nämlich, daß die kristallisierenden Paraffine die Viskosität der Öle im ungünstigen Sinne beeinflussen.

Wohl die größte Menge der Erdölprodukte bzw. der aus dem Rohstoff hergestellten Halb- oder Fertigfabrikate wandert zur Verbrennung in irgendeiner Form, nämlich als Triebstoff, als Leuchtöl, als Heizöl. Die Verwendungszwecke kennzeichnen schon die für die einzelnen Verwendungsarten erforderlichen Anteile. Als Heizöl findet daneben aber noch das Rückstandsöl an vielen Stellen

Digitized by Google

besonders an den Produktionsstätten, die ja an anderen Heizmaterialien arm sind, Anwendung. Ich brauche nur an die Namen Massut und Pakura zu erinnern, um dieses Anwendungsgebiet sofort weitgehend zu kennzeichnen. Was dann zwischen den dem Feuer geweihten Produkten liegt, ist das eigentliche Schmieröl und das Öl, welches den medizinisches Zwecken und all den andern Verwendungsstellen zugeführt wird. Das Öl dieser Gruppe bzw. die Stoffe dieser Gruppe lassen sich in ihrem Anwendungsgebiet generell kennzeichnen durch zwei Eigenschaften. Sie wirken isolierend und kühlend. Die Isolierung ist in diesem Falle so weitgehend zu verstehen, wie überhaupt dieses Wort auslegbar ist und dadurch ist eigentlich der Begriff der Kühlung schon an sich ein abhängiger von dem der Isolierung. Die Filmbildung durch das Öl an der Reibungsstelle von z. B. Metallen irgendwelcher Art und irgendwelcher Verwendung dient zur Trennung der beiden ohne den Ölfilm aufeinanderschleifenden Metallteile. Sie wirkt sekundär dadurch auch kühlend, daß sie überhaupt anwesend ist, aber sie wird an stark beanspruchten Stellen dadurch noch mehr zur Kühlung veranlaßt, weil der Ölfilm sich bewegt und im Vorschub das weitere Öl, welches sich an der Reibungsstelle im Lager befindet, an die beanspruchte Stelle führt. Die eigentliche Reibung findet also im Öl selbst statt und muß eine reine Flüssigkeitsreibung sein. Die umgebende Luft wirkt dann nach der kurzen Beanspruchung abkühlend auf das Öl, und in diesem Verlauf vollzieht sich der Prozeß weiter. Dies ist natürlich nur eine sehr schematische Darstellung. Das verlockende Eingehen auf die verschiedenen Theorien zum Schmierungsproblem muß ich mir versagen. Um eine Überspülung mit dem Schmiermittel gewissermaßen an der Reibungsstelle herbeizuführen sind dann die Schmierarten gebaut, die sich vor allen Dingen in den Ringschmierlagern, in dem Duffing-Lager, in der Schneiderschen Rollkettenlagerung, im Kugellager usw. usw. sehr vollständig durchgebildet haben. Ich möchte ausdrücklich sagen, daß ich die ganze interessante Serie der Lagerkonstruktionen nicht erwähnen kann. Es kann daher sehr wohl Unerwähntes besser oder gleich gut sein wie Erwähntes. Eine sehr weitgehende wissenschaftliche Bearbeitung dieser Fragen hat seit längerer Zeit eingesetzt.

Ich erwähne die weitsichtigen Arbeiten des Materialprüfungsamtes, die Arbeiten von Gümbel, denen ich nur mit Vorsicht folge, sowie die, die in der Stelle geleistet und angeregt werden konnten, der ich in der Kriegszeit vorstand. Im weiteren Verlauf sind dann die neuen sehr interessanten Arbeiten über die Filmbildung und die Filmmessung in den Lagern von Vieweg[1]) zu nennen und die Arbeiten, die von

[1]) Letzte Veröffentlichung über diese bahnbrechenden Arbeiten: Petroleum. Nr. 34. XVIII. 1922. S. 233 ff.

Digitized by Google

unserer Stelle[1]) wohl als mitinspiriert aufgefaßt werden dürfen, die den Namen Duffing und Dallwitz-Wegener tragen.

Wenn sich irgendwo der Beweis für meine immer wieder den technischen Dingen gegenüber vertretene Aussicht erbringen läßt, daß nicht in der Einhäusigkeit der Arbeit, sondern nur in der Arbeitsgemeinschaft zwischen den verschiedenen Fachwissenschaften ein wirklicher Erfolg zu erzielen ist, so ist dieser besonders auch bei unserer Arbeitsstelle[1]) gegeben gewesen. Hier hat das Wissen und Können des Ingenieurs, des Spezialphysikers und der Chemiker zusammen doch in kurzer Arbeitsperiode unter den allerschwersten Arbeitsverhältnissen sehr Wichtiges voranbringen können und auffallend einsichtige Verwaltungsstellen[2]) haben die Arbeitsdurchführung durch ihre Großzügigkeit und durch ihre technische Erkenntnis ermöglicht.

In unserem Falle hier interessieren uns nur relativ wenige Verwendungsgebiete, obwohl in der elektrotechnischen Industrie die Kraftmaschine und die Arbeitsmaschine in jeder Art bei der direkten Übertragung oder in der Transmission Schmiermittel verbraucht. Ich sehe aber absichtlich von diesen vielen Verwendungsgebieten ab und möchte nur noch eine generelle Angabe machen, um dann zu den wichtigsten Spezialfragen überzugehen.

Für die meisten Zwecke ist die wichtigste Forderung folgende: Bei relativ hohem Flammpunkt soll das Schmieröl das relativ niedrigste spezifische Gewicht haben und eine nur mäßige, eben für die Bildung des Tragfilms erforderliche Viskosität. Behalten wir diesen Gesichtspunkt im Auge, so werden wir ihre Wichtigkeit und Anwendbarkeit überall wiederfinden.

Als Beispiel sei die Vergleichsmessung des Kraftverbrauchs an einer Transmissionsanlage bei verschiedener Schmierung angeführt:

Schmierung mit konsistentem Fett . .	4152	Watt
„ „ Öl, Visk. . . 4,56.50°	2529	„
Verminderung des Kraftverbrauchs durch Ölschmierung	1623	Watt
oder	39,1	%.

Die wichtigste Krafterzeugungsmaschine für den Elektrotechniker ist die Turbine. Sie stellt bei ihrer außerordentlich schnellen Bewegung in den reibenden Teilen eine sehr große Anforderung an die Ölqualität. Es wird daher das Öl im möglichst schnellen Wechsel durch die Lager gedrückt. Es kommt dabei intensiv mit den Metallen in

[1]) Wissenschaftlich-technische Abteilung der Min. Versorg.-Ges. (früher Kriegsschmieröl-Ges.), Berlin.

[2]) Kriegsamt Sekt. „O“ Dr. A. Herz und Kriegsschmieröl Dir. R. Alberti. Berlin.

Digitized by Google

Berührung. Es wird unter Umständen Luft mit eingesaugt an die Lagerstellen und es ist die Möglichkeit gegeben, daß Dampf in das Öl gelangen kann. Natürlich können auch beim Einsaugen der Luft von benachbarten Arbeitsstellen chemisch wirkende Gase mit eintreten und es können vagabundierende Ströme zur Einwirkung kommen. Es ist daher hier die Erfordernis berechtigt, die Öle so indifferent zu gestalten wie möglich. Sind leicht zersetzliche Anteile vorhanden, so können sich krustige Ausscheidungen bilden. Es können Oxydationen unter Mitwirkung der vagabundierenden Ströme, aber auch ohne dieselben vorkommen. Man beobachtet dann an den Anfreßstellen der Lager bzw. im vom Öl getrennten Wasser Salpetersäure oder vom Ölabbau Säuren, am charakteristischsten Essigsäure und ganz eigenartige leicht verharzende Säuren vom Geruch der Oxysäuren oder Naphtensäuren. — Es ist daher Schutz der Öle gegen irgendwelche Einflüsse chemischer und physikalischer Art unerläßlich. Ebenso ist die richtige Bemessung und Dichthaltung der Kühler und genügend großer Ölvorrat unerläßlich, um ein zuverlässiges Absetzen des Kondenswassers vom Öl selbst und von Emulsionsschichten beim Ölumlauf zu erreichen. Die Nachteile äußern sich auch weiter z. B. in einer scheinbaren Bildung von seifenartigen Stoffen, die dann wieder zur Schaumbildung führen, eine Trennung von Öl und Wasser verhindern usw. usw. Ich könnte Ihnen aus der langen Beobachtungszeit, die mir persönlich zugänglich ist, eine beängstigend große Zahl von Fällen spezifizieren, in denen irgendein, dem aufmerksamen Beobachter zugänglich gewesenes Moment nicht beachtet wurde und aus Gewohnheit nicht beachtet werden konnte. So oft es auch gut ging, so oft wurde der richtige Moment übersehen und dann traten die schwierigsten und schwerwiegendsten Konsequenzen für ein ganzes Werk auf. Man hat dann kurz gesagt: „Ja, das Öl ist schlecht“ und derartige Äußerungen sind natürlich von dem leider nicht immer von der Berührung mit dem Öl sauber gebliebenen Handel gern aufgenommen und man hat den Betriebsführern gesagt: „Ja, seht Ihr wohl, Ihr müßt eben ein anderes Öl nehmen, z. B. möglichst das berühmte Spezial-Turbinenöl der betreffenden Firma, dann wird so etwas nicht mehr passieren“. Da weder das Öl noch die Maschine an sich an dem Übel Schuld hatte, sondern nicht beobachtete zufällige Umstände, die nicht immer gleich wieder auftreten brauchen, ging es dann auch wieder eine Weile gut. Wer nimmt sich die Zeit, bei derartigen Betriebsstörungen den Sachen wirklich bis auf die notwendigen Einzelheiten nachzugehen? Viele Male, wenn die Aufklärung gefunden war, hörte ich von den Herren des Werkes „Ach ja, es ist richtig, es ist ja einmal ein Schaden vorgekommen, aber wir haben jetzt ein anderes Öl, und da ist die Sache erledigt“. Kam dann nach 2 Jahren ein neuer Schaden, dann

Digitized by Google

war kaum noch eine Erinnerung an den ursächlichen Bericht aus der ersten Schädigung vorhanden, ja man hatte kaum Zeit gehabt, der Sache nachzugehen. Manchmal hatte man wohl auch die Berichte beiseite gelegt, da sie gewissermaßen gewisse Werksaufklärungen verlangten, die nicht gerade immer sehr gern gegeben werden.

Für Turbinenöle sind im Jahre 1922 zwischen der Vereinig. deutscher Elektrizitätsfirmen, den Ölfirmen und Wissenschaftlern Normalien geschaffen [1]).

9. Schalter- und Transformatorenöle.

Ebenso wichtig ist die Frage der Schalter- und Transformatorenöle. Auf diesem Gebiet hat zunächst die Gewohnheit Orgien gefeiert und aus der Gewohnheit haben sich dann Ableitungsmethoden gebildet, die, wie es bei der Empirie so häufig ist, doch zu recht zuverlässigen Anwendungsproben geführt haben. Was verlangen wir von einem Transformatorenöl? Es soll erstens durchaus indifferent gegen Metalle sein, es soll möglichst indifferent gegen das zum Schutz der Spulen verwendete Material sein, es soll zu dritt eine möglichst große Isolierfähigkeit aufweisen. Wie erreicht man diese Zwecke und wie kann man vorsorgen durch Prüfungen, daß Schäden sicher vermieden werden. Sehen wir uns einmal die Literatur an. Hier finden wir besonders in den elektrotechnischen Zeitschriften eine Reihe von Arbeiten, von denen in erster Linie die von Brauen zu nennen ist, der sehr weitgehenden Vergleichsgrundlagen geschaffen hat. Die Arbeiten Brauens haben schon in sich den Beweis dafür erbracht, worauf die einzelnen Schwierigkeiten in der Anwendung zurückgeführt werden müssen und sie haben weiter in ihrem Gefolge eine Reihe von Beobachtungen ausgelöst, die das Gebiet sehr weitgehend bis heute aufgeklärt haben, sodaß man eigentlich sagen kann, daß bei richtiger Auswahl und Behandlung des eingefüllten Öles und der Bauart des Transformators Schwierigkeiten und Verschlammung usw. kaum mehr vorkommen können. Die Lebensdauer solcher Transformatorenfüllungen ist infolgedessen eine beachtlich große geworden, ja es ist kaum zu sagen, ob sie nach der alten Gewohnheit mit 3 Jahren oder mit 7 oder 10 Jahren oder länger einen Abschluß erreicht. Mir wurde jedenfalls gesagt, daß Transformatoren heute bereits über 7 Jahre ohne irgendwelche Nachbehandlung oder Umfüllung in Betrieb sind.

10. Qualitätsanforderung (Destillate, Raffinate).

Wenn ich als Chemiker mich hier mit dieser Materie etwas näher beschäftige, so möchte ich dies nur von meinem Standpunkte aus tun,

[1]) Mitteil. d. Vereinig. der Elektrizitätswerke Nr. 324. 1922.

Digitized by Google

um so gewissermaßen neue Brücken zwischen den immer noch einhäusig arbeitenden Beobachtern zu bauen. Ich hatte Gelegenheit einige Prüfungen zu sehen und in langen Jahren Reihen von Kurven über elektrische Messungen an Transformatorenölen zu beobachten. Ich muß sagen, daß ich mich dem Eindruck nicht verschließen kann, als ob weniger die Meßmethoden als die Beobachtungen bei denselben wohl mit einer gewissen Verbesserung bedürftig sein würden. Über die Art der Ausführung der elektrischen Prüfungen hat Herr Prof. Schering von seinem Standpunkt aus eingehend in diesem Bande berichtet, bei der der Überschlag zwischen Spitzen, Platten, abgerundeten Konussen oder Kugeln gemessen wird. Zu verwerfen sind nach den Arbeiten der Spezialisten die Überschläge zwischen Spitzen. Die Abweichungen, die bei einer einheitlichen Arbeitsmethode gefunden werden, liegen noch immer in recht beachtlichen, als störend empfundenen Grenzen. Es wäre erwünscht, diese Fehlerquellen auszuscheiden, aber andererseits sind sie doch für die technische Verwendbarkeit, wenn nur ein gewisser kleinster Unterwert erreicht wird, nicht besonders bedenklich. Petersen hat versucht, neue Meßmethoden einzuführen. Soweit mir gesagt wurde, sind die Nachprüfungen nicht in jeder Beziehung eindeutig verlaufen. Sie gaben vielmehr Abweichungen zu den vorliegenden Erfahrungen, für die einstweilen noch die Erklärungen fehlen. Aus der Reihe der Publikationen möchte ich als immerhin beachtliche Arbeiten, die letzten Endes aber alle auf das gleiche Ergebnis hinauskommen neben der Brauenschen, die über das Trocknen von Transformatoren- und Schalterölen durch überhitzten Dampf von Schröder in der Zeitschrift „Petroleum“ und die von Schendell in der E.T.Z. im Juni 1918, ferner Breth (Einfluß der Raffinität und Viskosität) in der Zeitschrift „Petroleum“, schließlich Freitag in den „Elektrischen Nachrichten“ 1911; (vgl. „Mineralöl und Harzöl“) und andere nennen. Der Extrakt aus allen geht darauf hinaus, Öle von großer chemischer Indifferenz, einwandsfreier Trockenheit und Freiheit von jeder mechanischen Verunreinigung, guter Kältebeständigkeit, mäßiger Viskosität, kleinem spezifischem Gewicht und gutem Entfl.-Punkt als geeignet zu erklären. Die Arbeitsmethoden, die für die Sicherung der Verwendung angegeben werden, sind sehr mannigfache. Am besten und klarsten sind die Normen die von der Vereinigung der Elektrizitätswerke aufgestellt sind. Im Allgemeinen haben sich als genügend die Vorschriften vom Oktober 1920 bewährt[1]). Ich möchte daran verbessert wissen die spezifischen Gewichte und den Flammpunkt. Was die Bestimmungen[2]) der Verteerungszahl angeht, so ist heute ja über-

[1]) Die inzwischen neu aufgestellten Normen l. c.

[2]) Inzwischen ist die normale Vornahme der berechtigten Bestimmung der Verteerungszahl wieder möglich geworden. Auf die vielen und immer mit

Digitized by Google

haupt nur das abgekürzte Verfahren auszuführen, bei dem eine Stunde mit alkoholischer Lauge gekocht wird und das gebildete Zersetzungsprodukt seiner Menge nach zum Vergleich für den Wert herangezogen wird. In bezug auf die Kältebeständigkeit habe ich deswegen ein direkte Besorgnis nicht, weil der eingeschaltete Transformator ja eine gewisse Wärme entwickelt und so die zweifellos vorhandenen Nachteile eines nicht flüssigen Isolations- und Kühlmittels eigentlich überhaupt nicht vorkommen. Würde allerdings der ausgeschaltete Transformator mit einem erstarrten Öl gefüllt sein und nun ein Durchschlag beim Einschalten erfolgen, so würde die Verbrennungssubstanz nicht gleich von den Spulen abgeleitet werden können und dadurch naturgemäß die Isolationsfähigkeit wenigstens vorübergehend erheblich herabgesetzt werden. Hinzu kommt noch, daß ja auch gewisse Feuchtigkeit, wenn auch nur in minimalen Spuren sich bei dem Verbrennungs-(Verkohlungs-)Prozeß des Durchschlages zu bilden vermag. Vergleicht man hierzu die Arbeit von Schwab mit ihren interessanten Kurvenreihen, so sieht man den außerordentlichen starken Einfluss jeder Spur von Feuchttigkeit auf den Isolationwert. Ein niedriges spezifisches Gewicht und eine kleine Viskosität halte ich für so wertvoll, um eine automatische Selbstreinigung (durch Absinken der Verunreinigungen) und sichere Bewegung im Transformator herbeizuführen, daß ich darüber selbst eine leichtere Verdunstbarkeit nicht störend empfinden würde.

Andere Bedingungen, die auf die Art der Öle, die Farbe und dergleichen Bezug nehmen, sind gänzlich nebensächlich. Die Bestimmungen der Viskositätswerte und der Flammpunkte sind, wie schon dargetan, bisher mehr schematisch übernommen, sind aber nicht ohne Bedeutung. Alles weitere sagen die vorher mitgeteilten neuen Untersuchungsmethoden. Im Prinzip dürfte es aus den gemachten Ausführungen klar sein, wie die chemischen Vorgänge und die physikalischen von einander zwangsläufig abhängig sind.

11. Transformatorenöl.

Ich möchte noch kurz auf die Abb. 2 eingehen die einen verschlammten Transformator zeigt, wie man ihn früher von Zeit zu Zeit fand. Dies Bild ist mir freundlichst von einer Stelle überlassen worden, die auch für die zuverlässige Aufklärung dieses Übelstandes gesorgt hat. Es konnte nämlich eindeutig festgestellt werden, daß dieser Schmutz in

kleinen Abweichungen von unserem Normal belegten Auslands-Untersuchungsmethoden kann ich hier nicht eingehen. Dieselben sind auch vielfach erst in der allerletzten Zeit, aber lange nach diesem Vortrag bekannt geworden. Ich verweise u. a. auf E. T. Z. französische Arbeitsweise. B. B. C. Mitteilung u. d. m.

Digitized by Google

der Hauptsache aus Bleiverbindungen besteht und daß die Entstehung dieser Bleiverbindungen vielmehr thermischen, wie elektrischen Einwirkungen seine Existenz verdankt. Das Blei stammte aus den Verbleiungen der Mantelbleche, die man aus großer Vorsicht angewendet hatte. Verwendet man Schwarzblech, so ist die Ursache einer solchen Störung ausgeschaltet. Interessant war es, im Verfolg der Arbeiten zu dieser Sache festzustellen, daß überhaupt Metalle, wenn sie frei heizend in Öl zur Wirkung kommen, gewisse katalytische Wirkungen ausüben und gewisse Zersetzungen der Öle herbeiführen. Aus den Arbeiten ergab sich als Schlußfolgerung, daß das Austrocknen von Transformatorenölen möglichst nicht bei Temperaturen erfolgen solle, die nennenswert über 110° liegen bei Trockendauern, die nicht nennenswert 50 Stunden überschreiten. Blanke Kupferteile sind möglichst zu vermeiden. Heizungswiderstände sind vor der direkten Berührung mit dem Öl zu schützen bzw. umgekehrt. Ich persönlich würde im Interesse einer gesunden Ölwirtschaft im Transformator dringend empfehlen, Mittel und Wege zu suchen, um das verderbliche Auskochen der Öle zu umgehen. Viele Mißstände sind auf diese erste sehr kostspielige Überanstrengung der Öle zurückzuführen.

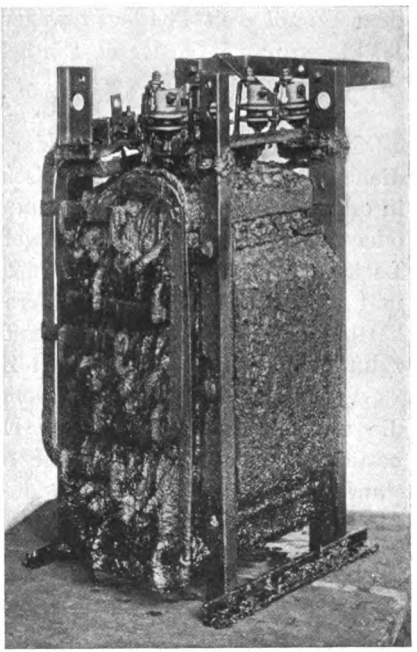


Abb. 2. Verschlammter Transformator (nach Aufnahme von Dr. E. Stern, AEG).

Jetzt taucht auch wieder die Frage auf, ob man nicht doch wieder dazu übergehen solle, die nach vielen Beobachtungen so gut bewährten Harzöle wieder für Isolationszwecke heranzuziehen.

Was läßt sich dafür und dagegen sagen? Die Harzöle haben die Nachteile, daß sie für die meisten Isolationslacke nachteilig sind, indem sie sie lösen und daß sie auch die Bandisolation zum Teil mehr angreifen, wie reine Mineralöle. Sie haben einen niedrigeren Entflammungspunkt und eine höhere Verdampfbarkeit wie Mineralöle, aber dagegen ein zuverlässiges hohes Isolationsvermögen und eine angeblich geringere Zersetzlichkeit im Betrieb. Die Mineralöle haben nach vorliegenden Beobachtungen ein Isolationsvermögen,

Digitized by Google

welches 20—30% niedriger ist, wie das der Harzöle, daneben aber in bezug auf die übrigen Konstanten größere Lebensfähigkeit, aber vielleicht nicht in allen Fällen gleiche Kältebeständigkeit.

12. Schalteröl.

Ich komme zu den Schalterölen, da ich leider bei den Transformatorenölen, obgleich sie es verdienten, nicht länger verweilen kann. Für die Schalteröle gilt die gleiche allgemeine Forderung, wie sie für Transformatoren aufgestellt ist, d. h. hoher Flammpunkt, absolute Dünnflüssigkeit und sehr gute Kältebeständigkeit. Nicht so sehr ist chemische Reinheit und Indifferenz erforderlich. Hier ist das Mineralöl dem Harzöl weit überlegen wegen der leichteren Verkohlbarkeit, der leichteren und intensiveren Eindickung und Verdunstung des letzeren.

13. Asphalt.

Noch andere Teile, die bei der Erdölverarbeitung gewonnen werden, dienen direkt der elektrotechnischen Industrie. Hier sind zu nennen, in erster Linie die hoch isolierenden Destillationsrückstände, die Peche oder Goudrone (Asphalte), die sowohl zur Bereitung von hochisolierenden Lacken, als auch zu Imprägniermassen sowohl direkt, wie zur Tränkung und auch als Zusatz zur größeren Beständigmachung der gummiisolierten Leitungen dienen. Paraffin, Ceresin und einige Heißdampfzylinderöle dienen gleichartigen Zwecken.

Von den Lacken, die zu Isolierzwecken angewendet werden, sind die aus den Rückständen der Erdöle hergestellten nicht mineralölbeständig, so große Vorzüge sie auch sonst in bezug auf ihre Widerstandsfähigkeit gegen jede andere Art chemischer und physikalischer Einwirkung haben. Widerstandsfähig gegen Mineralöle ist in gewisser Weise guter Leinöllack, jedoch kommen Quellungen und Zersetzungen vor, und daher sind meines Wissens zur Zeit als widerstandsfähigste Produkte Bekelite- und Cellonlacke in ihrer hohen Indifferenz zu bezeichnen.

Auf das analytische Gebiet einzugehen gestattet der verfügbare Raum nicht. Es mag genügen auf die wichtigen Werke über die Untersuchungsmethoden zu verweisen. Ich nenne Holde, Die Untersuchung der Kohlenwasserstofföle und Fette. Hinweisen möchte ich aber mit auf die wichtigen Arbeiten die über die Oberflächenspannung und die Schmierwirkung von Duffing, Dallwitz, Lenarts, Vieweg, Holde u. a. ausgeführt wurden. Diese ergeben neue Richtlinien und neue und wichtige Einblicke in die Vorgänge der Schmierung. Vielleicht bietet sich noch anderweitig die Gelegenheit, um auf all die gestreiften, wichtigen Fragen, die uns jetzt alle bewegen müssen, einzugehen, um unser Wirtschaftsleben auf wissenschaftlicherer Basis

Digitized by Google

sachlicher (technischer) gestalten zu können[1]). Wenn meine Mitteilungen hierzu schon etwas haben beitragen können, und wenn mehr Interesse an gemeinschaftlicher Arbeit durch dieselben erweckt wurde, so würde ich dies sehr begrüßen und den Zweck meines Referates, das auf ein scheinbar abgelegenes und schlüpferiges Gebiet geführt hat, als erreicht ansehen können. Das Gebiet ist, so schmierig es auch aussieht, doch einladend genug, um die erforderlichen Arbeiten mit wissenschaftlichem und technischen Genuß ausführen zu können.

Technische Bedingungen für in Kesselwagen oder eisernen Fässern angelieferte Mineralerdöle für Transformatoren und Schalter.

1. Als Mineralerdöle sollen für Transformatoren und Schalter nur Raffinate aus Erdölen verwendet werden. Die Anlieferung darf nicht in Holzfässern erfolgen.
2. Das spezifische Gewicht darf nicht weniger als 0,85 und nicht mehr als 0,95 bei 20° C betragen.
3. Der Flüssigkeitsgrad (Viskosität), bezogen auf Wasser von 20° C, soll bei einer Temperatur von 20° C nicht über 8° Engler sein.
4. Der Flammpunkt, nach Marcusson im offenen Tiegel bestimmt, soll nicht unter 145° C liegen.
5. Der Stockpunkt des Transformatorenöles soll minus 5°, derjenige des Schalteröles minus 15° C betragen; d. h. das Verhalten des Öles in der Kälte muß derart sein, daß es nach einstündigem Abkühlen auf minus 5° C bzw. minus 15° C noch fließt.
6. Das Öl soll bei 20° C vollkommen klar sein; es soll frei sein von Mineralsäure. Der Gehalt an organischer Säure darf höchstens 0,2, berechnet als Säurezahl, betragen. Der Gehalt an Asche darf 0,01 v. H. nicht übersteigen.
7. Das Öl soll praktisch frei von mechanischen Beimischungen sein.
8. Die Verteerungszahl des ungebrauchten Öles darf 0,3 v. H. nicht übersteigen.
9. Die Prüfung der Transformatoren- und Schalteröle hat nach den hierfür gegebenen Ausführungsbestimmungen zu erfolgen.

Anmerkung: Das Öl ist vor dem Einfüllen in die Transformatoren und Schalter zu trocknen.

Berlin, im November 1922. Ver. d. Elektr.

Untersuchungsmethoden für Transformatoren-, Schalter- und Dampfturbinenöle.

Zu 1. Probeentnahme. Zur Entnahme von Proben aus den zur Ablieferung bzw. zur Abnahme bereitstehenden Tankwagen oder Fässern wird wie folgt verfahren:

a) Für Tankwagen: Ein Glasrohr von $1^1/_2$—2 m Länge (ca. 15 mm l. W.), welches auf der einen Seite rund abgeschmolzen ist, so daß man es gut mit dem

---

[1]) Leider zeigt die elektrotechnische Industrie befremdlich wenig Interesse für das Forschungsinstitut für Mineralöle an der Techn. Hochschule Charlottenburg.

Digitized by Google

Daumen verschließen kann, und auf der anderen Seite ein wenig stumpf ausgezogen ist, wird im geöffneten Zustande langsam durch den Dom des Wagens bis zum Boden des Tankwagens eingeschoben, so daß beim Durchschieben aus allen Teilen des Wageninhaltes Teile in das Rohr eintreten. Wenn das Rohr den Boden berührt, wird es mit dem Daumen verschlossen und aus dem Wagen herausgehoben. Der Inhalt des Rohres und das eventuell außen anhaftende Öl wird in ein Gefäß gebracht. In gleicher Weise wird die Probeentnahme so oft wiederholt, bis mindestens eine Probemenge von 2 Litern vorhanden ist. Es wird nochmals gut umgerührt und die so entnommene Probe in zwei Teile geteilt, von denen die eine für eine Kontrollprüfung für den Fall der bei der Werkuntersuchung gefundenen Abweichung zurückgestellt wird. Wird die Probe als einwandfrei erachtet, so kann eine Gegenprobe höchstens für die Sammlung von Vergleichsmaterialien bzw. Beanstandungen genau bezeichnet und einwandfrei verschlossen zurückgehalten werden. Eine Verpflichtung hierzu besteht aber bei erfolgter Abnahme nicht.

b) Für Fässer: Ein Glasrohr gleicher Ausführung wie zu a) beschrieben, aber entsprechend kürzer, wird durch das geöffnete Spundloch eines jeden fünften Fasses eingeführt. Aus jedem dieser Fässer wird eine Probe entnommen oder doch jedenfalls soviel, daß aus der gesamten Sendung wieder eine Probemenge von rund zwei Litern gebildet werden kann. Auch hier wird wieder gut durchgemischt und im übrigen wie oben verfahren.

Zu 2. Spezifisches Gewicht. Die Ausführung der Bestimmungen des spezifischen Gewichts kann nach einer beliebigen Arbeitsweise vorgenommen werden. Für die Umrechnung auf 20° ist der Ausdehnungskoeffizent von 0,0007 zu benutzen:

Beispiel:

gefundenes spez. Gewicht bei 15° . . .	0,8700
— Korrektur = 5 × 0,0007	— 0,0035
spezifisches Gewicht bei 20°	0,8665

Zu 3. Flüssigkeitsgrad. Zur Viskositätsbestimmung wird der Apparat von Engler benutzt (siehe Holde, „Untersuchung der Kohlenwasserstoffe, Öle und Fette", 4. Aufl., S. 139).

Zu 4. Flammpunkt. Zur Flammpunktbestimmung ist der im „Holde", 4. Auflage, Abb. 74 und 75 (5. Auflage, Abb. 35) abgebildete Apparat mit horizontaler Flammenführung zu benutzen (Versuchsausführung vergleiche daselbst S. 178, bzw. 5. Aufl., S. 61/62). Hierzu sind die vorschriftsmäßigen, von der PTR geeichten Flammpunkt-Thermometer zu verwenden, bei deren Eichung die Korrektur für den herausragenden Faden bereits berücksichtigt ist.

Zu 5. Stockpunkt. Das Verhalten des Öles in der Kälte ist nach folgender Methode zu prüfen:

Das Öl wird in ein 15 mm weites Reagenzglas, 3 cm hoch, mittels eines Gestelles oder Halters senkrecht eingestellt und so 1 Stunde lang kühl gehalten. Als Kühltemperatur ist die in den entsprechenden Bedingungen angegebene Temperatur (Stockpunkt) zu wählen. Die Einfüllung muß mittels einer Pipette so erfolgen, daß die Glaswand nicht benetzt wird. Die Abkühlung erfolgt in einer Salzlösung, die durch Auflösung von 25 Teilen Salmiak in 100 Teile Wasser zu bereiten ist. Die Abkühlung dieses Bades wird durch Einstellung der Lösung in eine Mischung von Eis und Viehsalz bewirkt. Nach Ablauf einer Stunde wird das Reagenzglas, ohne es herauszunehmen, in eine schräge Lage gebracht und die Veränderung des Flüssigkeitsspiegels beobachtet. Der flüssige Zustand des Öles zeigt sich nach dem Herausnehmen des Reagenzglases daran, daß die Glaswandung vom Öl einseitig benetzt ist.

Digitized by Google

Zu 6. Reinheit des Öles. Zur Feststellung, ob das Öl klar ist, wird eine frisch aus dem Versandgebinde entnommene Probe in einem Reagenzglase von 15 mm l. W. eine Stunde lang bei 20° der Ruhe überlassen. Ist die Probe nach dieser Zeit klar, so entspricht sie den Anforderungen.

Zum Nachweis von freier Mineralsäure werden (nach Holde) 100 cm³ Öl mit 200 cm³ heißem, destilliertem Wasser im Scheidetrichter oder Kolben kräftig durchgeschüttelt, bis sich das Öl genügend im Wasser verteilt hat. Nach dem Absetzen filtriert man durch ein angefeuchtetes Faltenfilter und versetzt das Filtrat mit einigen Tropfen Methylorange, wobei keine Rotfärbung eintreten darf.

Säurezahl. 10 g Öl werden in einem 200 cm³ fassenden Erlenmeyerkolben eingewogen und in 75 cm³ eines vorher neutralisierten Gemisches von 2 Teilen Benzol und 1 Teil Alkohol aufgelöst. Hierbei wird nach Versetzen mit einigen Tropfen Phenolphthaleinlösung aus einer Bürette eine genau eingestellte, $^1/_{10}$ normal alkoholische Kalilauge bis zur deutlichen Rotfärbung zugegeben. Die Säurezahl ist der Verbrauch an mg KOH für 1 g angewandtes Öl. Wurden bis zum Farbumschlag beispielsweise $^3/_{10}$ cm³ KOH verbraucht, so errechnet sich die Säurezahl wie folgt: $\frac{0{,}3 \times 5{,}6}{10} = 0{,}168$ mg KOH.

Aschegehalt. Etwa 20 g, besser etwa 100 g Öl werden in einem Tiegel aus Platin, Porzellan oder Quarz auf der analytischen Wage eingewogen (Schale ist vorher auszuglühen und für sich zu wiegen) und über freier Flamme langsam bis zum Brennpunkt erhitzt. Sobald die Öldämpfe sich entzündet haben, muß man mit dem Erhitzen vorsichtig fortfahren, um Verspritzungen zu vermeiden. Nachdem das Öl abgebrannt ist, wird der entstandene Ruß vorsichtig abgeglüht. Sollte sich schwer verbrennlicher Koks gebildet haben, so ist die Asche mit heißem Wasser auszuziehen und durch ein quantitatives Filter zu filtrieren. Das Filtrat wird in dem vorher benutzten Tiegel, nachdem die Kohle und das Filter in diesem verbrannt sind, zur Trockne eingedampft. Der gesamte Rückstand wird dann vorsichtig bis zur beginnenden Rotglut erhitzt und nach dem Erkalten gewogen.

Zu 8. Verteerungszahl[1]). A) Methode, die bei Transformatoren- und Schalterölen im Zweifelsfalle als Schiedsmethode gilt. (70 h 120° O_2.) 150 g des frischen, ungebrauchten filtrierten Öles werden in einem 300 cm³ fassenden Erlenmeyerkolben (Schott & Gen., Jena) in einem Ölbade 70 Stunden ununterbrochen unter gleichzeitigem Durchleiten von Sauerstoff auf 120° erwärmt. Der Sauerstoff passiert 2 Waschflaschen, von denen die erste mit Kalilauge (spez. Gew. 1,32), die zweite mit konz. Schwefelsäure (spez. Gew. 1,84) beschickt ist (die Waschflaschen sollen ein Fassungsvermögen von mindestens $^1/_4$ Liter haben bei hoher zylindrischer Form und sollen zu etwa $^1/_5$ ihrer Höhe mit der Waschflüssigkeit beschickt sein). Die Erwärmung wird in einem zuverlässig regulierbar geheizten Ölbad ausgeführt. Die vorgeschriebene Temperatur ist in dem zu untersuchenden Öl zu überwachen. Das Ölbad ist mit einem Rührwerk auszustatten. Der Kolben ist durch einen Korkstopfen mit seitlicher Einkerbung verschlossen, durch den das 1—2 mm über dem Boden des Kolbens mündende Einleitungsrohr führt. (Die lichte Weite des Einleitungsrohres soll genau 3 mm, die Anzahl der Blasen pro Sekunde 2 betragen.)

Nach der geschilderten 70stündigen Vorbehandlung werden 50 g des gut durchgeführten Öles in einem mit Rückflußkühler versehenen, 300 cm³ fassenden Erlenmeyer nach Zusatz einiger Siedesteine 20 Minuten lang auf siedendem Wasserbade mit 50 cm³ einer Lösung erwärmt, welche durch Auflösen von 75 g

[1]) Ist nur bei feinstem, ungebrauchtem Öl zu bestimmen! Frank.

Digitized by Google

möglichst reinem Ätznatron in 1 Liter dest. Wasser und durch Hinzufügen von 1 Liter 96prozentigem Alkohol zu bereiten ist. Ohne den Rückflußkühler zu entfernen, wird hierbei das warme Gemisch 5 Minuten lang kräftig geschüttelt, wobei der Kolben zweckmäßig mit einem Tuch umwickelt wird. Sein Inhalt wird nach dem Erkalten in einen Scheidetrichter übergeführt und nach eingetretener Schichtung ein möglichst großer Anteil der alkoholisch-wäßrigen Lauge durch ein gewöhnliches Filter in einen Kolben filtriert. Von dem Filtrat werden 40 cm³ abpipettiert, in einem zweiten Scheidetrichter mit einigen Tropfen Methylorange versetzt und mit Salzsäure bis zur deutlichen Rotfärbung der Flüssigkeit angesäuert (hierzu sind etwa 6 cm³ Salzsäure vom spez. Gew. 1,124 erforderlich). Die durch das Ansäuern abgeschiedenen Teerstoffe werden in 50 cm³ reinem Benzol vom Siedepunkt 80/82° (das beim Eindampfen auf dem Wasserbade keine Spur eines Rückstandes hinterlassen darf) aufgenommen. Starkes Schütteln ist zu vermeiden, da sonst Emulsionsbildung auftritt. Das Ausschütteln ist mit 50 cm³ Benzol in einem dritten Scheidetrichter noch einmal zu wiederholen.

Nach dem Ablassen der wäßrigen Schicht wird der erste Benzolauszug im Scheidetrichter Nr. 3 mit dem zweiten Benzolauszuge vereinigt, wobei der Scheidetrichter Nr. 2 mit etwas Benzol nachzuspülen ist. Der Benzolauszug wird dann im Scheidetrichter Nr. 3 zweimal mit je 50 cm³ destilliertem Wasser sorgfältig ausgeschüttelt.

Nach dem Ablassen der letzten sichtbaren Wasserreste wird die im Scheidetrichter zurückbleibende Benzollösung in einen Weithalsstehkolben von 250 cm³ Inhalt (Schott & Gen., Jena) übergeführt, der zuvor mit einigen Siedesteinen gemeinsam auf der analytischen Wage gewogen wurde. Dieser Kolben wird mit einem tadellosen, gut ausgepreßten und von jeglichem Korkstaub befreiten, durchbohrten Korken, in dem ein möglichst direkt über ihm abgebogenes weites Dampfableitungsrohr steckt, das in einen Kühler mündet, verschlossen und mittels eines Ringes, welcher Einkerbungen zum Durchleiten des Wasserbaddampfes besitzt, auf das Wasserbad gestellt. Kolben und Ableitungsrohr werden dann mit einem oben geschlossenen Blechmantel überdeckt, der an einer Seite zur Durchführung des Ableitungsrohres geschlitzt ist. Das Wasserbad wird dann so stark erhitzt, daß die in den Blechmantel steigenden Dämpfe diesen und damit auch Kolben und Ableitungsrohr mit erwärmen und so jegliches Dephlegmieren der Benzoldämpfe verhindern. Nach dem Eindampfen wird etwas Alkohol (absoluter oder 96prozentiger) zugegeben, um etwa vorhandenes Wasser zu verjagen, und der Kolben offen und liegend auf das mit gewöhnlichem Ringe versehene Wasserbad gestellt, so daß die schweren Dämpfe bequem abfließen können. Dann wird der Kolben in einem auf 105° eingestellten Trockenschrank 10 Minuten lang getrocknet und nach dem Erkalten gewogen. Die gefundene Teermenge wird mit 2,5 multipliziert und die Verteerungszahl prozentual errechnet.

B) Die von der AEG vorgeschlagene Natriumsuperoxydmethode. 2) (Na_2O_2) kann angewendet werden. Falls die Ergebnisse den Grenzwert überschreiten, ist der Wert der Bestimmungsmethode A ausschlaggebend.

Bei Ausführung der Natriumsuperoxydmethode kommt die 70stündige Vorbehandlung mit Sauerstoff in Fortfall. Es werden in dem 400 cm³ fassenden Erlenmeyerkolben, der absolut trocken sein muß, 3 g des Natriumsuperoxyds eingewogen. Dazu werden 50 g des frischen filtrierten Öls gegeben und danach 50 cm³ der oben beschriebenen alkoholisch-wäßrigen Lauge hinzugefügt. Der Kolben wird mit Rückflußkühler verschlossen und auf dem Wasserbade vorsichtig unter häufigem Umschütteln 20 Minuten lang erwärmt. Wird die Reaktion zu heftig, so muß zwischendurch der Kolben vom Wasserbade entfernt werden.

Digitized by Google

Die weitere Arbeitsweise ist die gleiche wie oben geschildert, nur mit der Änderung, daß zum Ansäuern der Lauge eine größere Menge Salzsäure erforderlich ist.

C) Methode nach Prof. Schwarz und Prof. Marcusson (50 h 120°). 50 g Öl werden in einem enghalsigen Normal-Erlenmeyerkolben (Jenaer Glas) von 200 cm³ Inhalt (vgl. Z. angew. Chem., Nr. 88, S. 629, vom 3. 11. 1922) 50 Stunden ununterbrochen auf 120° erhitzt. Bewährt hat sich für die Erhitzung auf konstante Temperatur eine elektrisch heizbare Platte mit angeschweißtem Rand für Ölbad und selbsttätiger Wärmeregelung oder ein elektrisch geheiztes Luftbad (Hersteller Heraeus, Hanau). Nach Beendigung der Erhitzung wird das Öl 15 Minuten auf etwa 80° C am Rückflußkühlrohr mit 50 cm³ einer Lösung erwärmt, welche durch Auflösen von 75 g reinem Ätznatron in 1 Liter dest. Wasser und durch Hinzufügen von 1 Liter 96prozentigem Alkohol zu bereiten ist. Das warme Gemisch wird 5 Minuten kräftig geschüttelt; sodann gießt man das Flüssigkeitsgemisch in einen Scheidetrichter und läßt über Nacht absitzen. Ein möglichst großer Teil der Lauge wird in einen Meßzylinder abfiltriert und mit 30 cm³ leichtsiedendem Benzin ausgezogen. Der Benzinauszug wird nochmals mit 10 cm³ 50prozentigem Alkohol unter Zusatz einiger Tropfen Natronlauge behandelt; die alkoholische Schicht wird mit der Teerseifenlösung vereinigt, die vereinigten Seifenlösungen dann mit verdünnter Salzsäure bis zur sauren Reaktion versetzt. Nach zwei- bis dreimaligem Ausschütteln der sauren Lösung mit je 50 cm³ Benzol werden die vereinigten Benzolauszüge mit wenig dest. Wasser mineralsäurefrei gewaschen und eingedampft. Der Rückstand wird etwa 10 Minuten bei ungefähr 105° C getrocknet und gewogen.

Die Menge der erhaltenen Teerstoffe ist, da nicht die gesamte Lauge abfiltriert wurde, auf 50 cm³ zu beziehen, schließlich ist der Befund auf die angewandte Ölmenge prozentual umzurechnen.

Zu 9. Emulgierbarkeit. 100 cm³ Öl werden in einem kalibrierten Zylinder von 36 cm Höhe und 4,3—4,5 cm l. W. mit 50 cm³ dest. Wasser auf dem Wasserbade erwärmt; hat die Mischung etwa 100° C erreicht, so wird 10 Minuten lang Dampf aus einem sauberen Dampfentwicklungsgefäß (Rundkolben oder Blechkanne), das mit dest. Wasser gefüllt ist, scharf eingeblasen. Die Spitze des Ausblaserohres soll möglichst dicht über dem Boden des Glasgefäßes sein, zu dessen Schutze unter dem Austritte des Ausblaserohres ein Blechplättchen angebracht ist.

Nach dem Dampfeinleiten wird das durchmischte Öl wiederum wenigstens 10 Minuten lang ins Wasserbad gestellt, um die Trennung zwischen Wasser und Öl zu beschleunigen; alsdann überläßt man das Öl eine Stunde lang der Ruhe.

Nicht emulgierendes Öl trennt sich nach einigen Minuten in glatter Schicht vom Wasser. Auch bei guten Ölen tritt oft eine leichte Trübung (schwache Spuren von Feuchtigkeit [Hygroskopizität]) ein, die nach kurzer Zeit wieder verschwindet. Bei wenig gutem Öl bleibt eine stärkere Trübung und an der Trennungsstelle eine schaumige Mischung von Wasser und Öl. Ist diese Schicht nach 20minutigem Stehen nicht stärker als 2 mm, so gilt das Öl als schwach emulgierbar; ist sie stärker als 2 mm, oder ist überhaupt eine klare Trennungsschicht nicht zu erkennen, so ist das Öl stark emulgierbar.

Neuerdings ist auch von der Isolierstoffkommission des VDE ein Entwurf zu Prüfvorschriften für Schalter- und Transformatorenöle (ETZ 1923 S. 601) ausgearbeitet.

Digitized by Google

IX. Die Prüfung der Isolierstoffe.

Von **H. Schering.**

In den theoretischen Grundlagen sind die elektrischen Erscheinungen bei Isolierstoffen erörtert und erklärt worden. Wie man diese Erscheinungen messend verfolgt, soll der folgende Abschnitt behandeln. Doch ist dies nur ein Teil der Aufgabe, weiterhin sind die Prüfmethoden zu besprechen, welche gestatten, unter den isolierenden Baustoffen der Elektrotechnik, die für den jeweiligen Verwendungszweck geeigneten auszuwählen. Es sind dabei auch andere als nur elektrische Vorgänge und Eigenschaften zu erörtern.

1. Elektrische Messungen.

Stellen wir uns kurz mit einigen Stichworten die elektrischen Vorgänge zusammen.

Ein Isolierstoff befindet sich zwischen zwei leitenden Belegungen.

Eine Gleichspannung wird an die Belegungen gelegt, es fließt dann

1. Ein Verschiebungsstromstoß durch den Isolierstoff im Augenblick des Anlegens der Spannung.
2. Ein Nachwirkungsstrom durch den Isolierstoff, allmählich abklingend.
3. Ein Leitungsstrom durch den Isolierstoff dauernd.
4. Ein Leitungsstrom auf der Oberfläche des Isolierstoffs dauernd.

Wird eine Wechselspannung an Stelle der Gleichspannung an die Belegungen gelegt, so fließt außer den Leitungswechselströmen durch den Isolierstoff und längs seiner Oberfläche noch durch den Isolierstoff dauernd ein Verschiebungswechselstrom. Mit diesem ist in den meisten festen und flüssigen Isolierstoffen ein Energieverlust verknüpft, der dielektrische Verlust.

Den Gesamtwechselstrom kann man in zwei Komponenten zerlegen:

5. Den Blindstrom oder Kapazitätsstrom, der keinen Anteil am Energieverbrauch hat.
6. Den Wirkstrom oder Verluststrom, der allein den Energieverbrauch deckt.

Steigert man die Spannungen an den Belegungen des Isolierstoffes, so tritt schließlich ein:

7. Der elektrische Durchschlag.

Digitized by Google

2. Der Durchgangswiderstand bei Gleichspannung.

Den Leitungsstrom durch den Isolierstoff allein kann man in der Schaltung Abb. 1 messen. In die Leitung von der Spannungsquelle Q zu der Elektrode B ist das Galvanometer G gelegt. Diese Elektrode ist rings umgeben von einem fest auf den Isolierstoff gepreßten leitenden Schutzring S, welcher unter Umgehung des Galvanometers direkt mit dem entsprechenden Pol der Spannungsquelle verbunden ist. Dieser Schutzring fängt den auf der Oberfläche des Isolierstoffes fließenden Leitungsstrom ab, durch das Galvanometer fließt nur der den Isolierstoff von der Elektrode B durchsetzende Leitungsstrom, wenn man solange wartet, bis der Nachwirkungsstrom abgeklungen ist.

Wählt man die Elektrode A entsprechend groß und den Spalt zwischen dem Schutzringe B und der Elektrode B, zwischen denen ja eine nennenswerte Spannungsdifferenz nicht besteht, sehr schmal, so wird der der Elektrode B entsprechende Ausschnitt des elektrischen Feldes recht homogen.

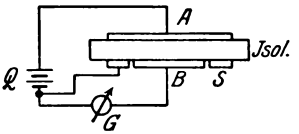


Abb. 1. Messung des Durchgangswiderstandes mit Schutzring.

Bei zylindrischen Elektroden, z. B. einem Kabel, bringt man an den beiden Enden Schutzringe in Zylinderform an.

In der Regel ist es zweckmäßig den Pol der Spannungsquelle an dem das Galvanometer liegt zu erden, worauf weiter unten noch näher eingegangen ist; man bezeichnet dann die Schutzringe auch schlechtweg als Schutzerdung.

Das Verhältnis der Spannung zu dem mit dem Galvanometer gemessenen Strom bezeichnet man analog dem Ohmschen Gesetz als Durchgangswiderstand. Tatsächlich gilt das Ohmsche Gesetz jedoch für Isolierstoffe im allgemeinen nicht, sondern die Stromstärke wächst schneller als proportional der Spannung. Die Angabe eines Durchgangswiderstandes ist daher unvollständig, wenn nicht auch die Spannung genannt ist, bei der er gemessen wurde. Aus dem gleichen Grunde hat auch die Berechnung eines „spezifischen" Durchgangswiderstandes d. i. der eines Würfels von 1 cm Kantenlänge wenig Wert, da wegen der Spannungsabhängigkeit eine korrekte Umrechnung auf andere Dimensionen, bei denen das Spannungsgefälle ein anderes wird, nicht möglich ist.

Überhaupt muß man bei der Untersuchung der Isolierstoffe im Auge behalten:

Während bei den elektrischen Leitern der spez. Widerstand von ausschlaggebender Bedeutung ist, interessiert technisch bei den „Nichtleitern", den Isolierstoffen, der Widerstand zunächst nur insofern,

Digitized by Google

als er eine gewisse Größe nicht überschreiten darf, damit der Baustoff für den betreffenden Zweck praktisch als „Nichtleiter" angesehen werden darf. Gewiß schwanken die Anforderungen an die Höhe des Durchgangswiderstandes zur Flächeneinheit mit dem Verwendungszweck und dem Umfang der Verwendung des Isolierstoffes beträchtlich, man denke nur an einen Lampensockel, die Klemmenisolierung eines Präzisionswiderstandes von 100000 Ω und ein kilometerlanges Kabel, aber man kommt dabei stets mit einer Abstufung nach Größenordnungen von Zehnerpotenzen aus.

Darüber hinaus würde die Messung des Durchgangswiderstandes ein Interesse haben, wenn er ein Kriterium für den Zustand und die Güte des Isolierstoffes ist. Früher hat man in großem Umfange, ja fast ausschließlich, bei der elektrischen Prüfung Durchgangswiderstände gemessen. Aber die Erkenntnis brach sich Bahn, daß ein besonders hoher Durchgangswiderstand allein keineswegs ein Kennzeichen für ein technisch brauchbares Isoliermittel ist, so erwiesen sich z. B. isolierte Leitungen von besonders hohem Isolationswiderstand als wenig widerstandsfähig gegen elektrischen Durchschlag. Durch Beimischung von Harzen kann man in vielen Fällen den Durchgangswiderstand beträchtlich steigern, aber es können dadurch andere sehr wesentliche Eigenschaften, wie Zähigkeit, Unbrennbarkeit usw. zwecklos verdorben werden. Man hat daher neuerdings in weitem Umfange die Spannungsprobe, die Beanspruchung auf Durchschlag mit Wechselspannung, an die Stelle der Isolationswiderstandsmessung gesetzt.

Viele feste Stoffe isolieren in vollständig trockenem Zustande hervorragend, verlieren aber diese Eigenschaft, wenn sie Feuchtigkeit enthalten, die Messung des Durchgangswiderstandes kann daher als außerordendlich empfindliches Reagens bei Trocknungsprozessen benutzt werden. Umgekehrt könnte man auch durch Messung des Durchgangswiderstandes feststellen, ob Isolierstoffe feuchtigkeitssicher sind. Viele Isolierstoffe insbesondere die Preßstoffe werden aber nur in Stärken von mehreren Millimetern aufwärts hergestellt. Wenn nun ein derartiges dickeres Stück etwas hygroskopisch ist, so würde es doch unter Umständen sehr lange dauern bis beim Liegen im Wasser die Feuchtigkeit ganz ins Innere eingedrungen ist. Solange aber noch eine trockene Schicht im Innern vorhanden ist, würde der Durchgangswiderstand nicht sehr wesentlich heruntergehen. Bei der praktischen Verwendung des Isolierstoffes als Träger spannungsführender Teile würde aber zwischen diesen ein beträchtlicher Strom über die durch Feuchtigkeit leitend gewordene Oberfläche des Isolierstoffes fließen, Es ist daher zweckmäßig als Kriterium der Feuchtigkeitssicherheit den „Oberflächenwiderstand" zu messen.

Digitized by Google

3. Der Oberflächenwiderstand bei Gleichspannung.

Zwei leitende Schneiden werden in gewissem Abstande auf die zu untersuchende Oberfläche des Isolierstoffes gesetzt (Abb. 2), die eine Schneide wird über das Galvanometer G mit dem einen Pol der Spannungsquelle Q verbunden, die andere Schneide direkt an den anderen Pol von Q gelegt. Jede Schneide wird von je einem Isolierstreifen gehalten, die an einer Metallplatte befestigt sind. Diese ist unter Umgehung des Galvanometers mit dem entsprechenden Pol der Spannungsquelle verbunden, so daß nicht ein Strom von der einen Schneide zur anderen über die Trageisolation fließen kann. Es fließt nun je ein Strom von einer Schneide zur anderen:

1. Über die schmale Fläche des Isolierstoffes zwischen den Schneiden.
2. Um die Ränder und die Unterseite der Isolierplatte.
3. Durch das Innere des Isolierstoffes.

Um einen streng definierten Oberflächenwiderstand zu erhalten müßte man nur den Strom unter 1. messen, man könnte den Strom unter 2. und den größten Teil des Stromes unter 3. von der Messung ausschließen, indem man die Isolierplatte auf eine Metallplatte legt, die unter Umgehung des Galvanometers unmittelbar mit dem entsprechenden Pol der Spannungsquelle verbunden ist. Messungen an verschiedenen Isolierstoffen haben gezeigt, daß bei gut isolierenden die Anwendung der Metallunterlage praktisch ohne nennenswerten Einfluß ist, bei schlechten feuchten Platten hingegen wird der Strom durch das Galvanometer erheblich herabgesetzt, wenn man mit der Metallunterlage die Ströme unter 2. und 3. abfängt. Dadurch aber erscheinen schlechte Isolierstoffe bei der Messung günstiger als sie sich in der Praxis als Träger spannungführender Teile verhalten würden. Da es sich bei diesen Messungen nicht um die Bestimmung einer physikalischen Konstanten, sondern um eine technische Brauchbarkeitsprüfung handelt, erscheint es zweckmäßig die Metallunterlage fortzulassen und den Prüfling auf eine gut isolierende Unterlage zu legen.

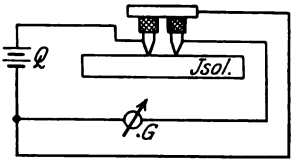


Abb. 2. Messung des Oberflächenwiderstandes.

Das Verhältnis von Spannung und gemessenem Strom bezeichnet man als Oberflächenwiderstand (wie aus den obigen Ausführungen hervorgeht, ist diese Bezeichnung für schlecht isolierende feuchte Stoffe allerdings nicht streng zutreffend). Der Oberflächenwiderstand ist aber von der Spannung stark abhängig, diese muß also mit angegeben werden.

Da sich der Oberflächenwiderstand als außerordentlich scharfes

Digitized by Google

Reagens für Feuchtigkeits- und andere Einflüsse, welche das Isoliervermögen herabsetzen, erwies, wurde zu seiner Bestimmung in der Physikalisch Technischen Reichsanstalt der in Abb. 3 dargestellte Normalapparat entwickelt, der vom Verbande deutscher Elektrotechniker[1]) in die Prüfvorschriften für die Untersuchung elektrischer Isolierstoffe aufgenommen ist.

Zwei 10 cm lange mit Staniol bekleidete Weichgummistreifen als Schneiden sind in 1 cm Abstand voneinander in zwei Messingbacken eingeklemmt, jede mit einer Anschlußklemme versehene Backe ist mit einem Isolierstreifen an einer metallenen Halteplatte befestigt, die nach Abb. 2 geschaltet die Kriechströme über die Isolation der Backen abfängt.

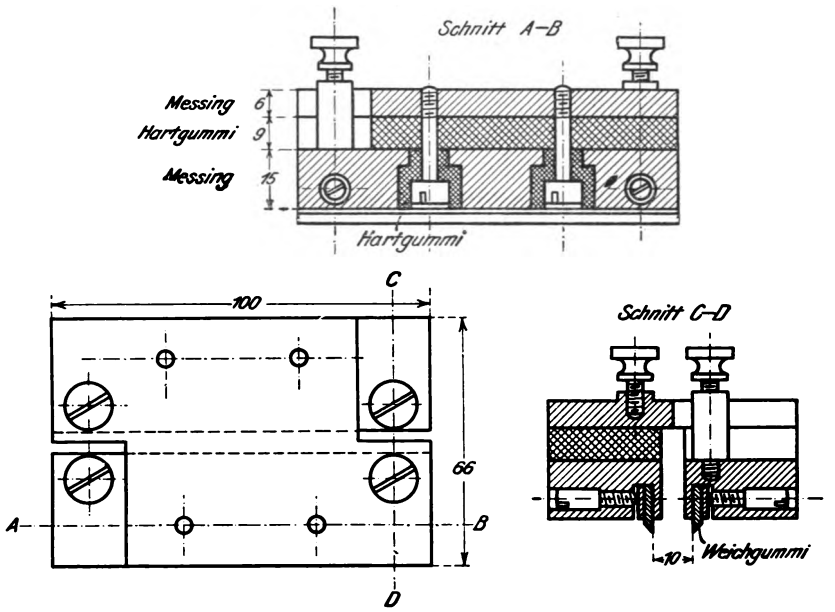


Abb. 3. Normalapparat zur Messung des Oberflächenwiderstandes.

4. Die Widerstandsmessung bei Gleichspannung.

Zur Messung der vielfach sehr schwachen Ströme bedient man sich eines D'Arsonval-Spiegelgalvanometers hohen Widerstandes — meist von 1000 Ω in der Spule und 9000 Ω Vorschaltwiderstand — mit einer Empfindlichkeit von etwa $1 \times 10^{-9} A$ für 1 mm Ausschlag bei 1 m Skalenabstand. Zweckmäßig ist die objektive Ablesung des vom Galvanometerspiegel auf die Skala entworfenen Bildes eines leuchtenden Fadens. Die Empfindlichkeit wird in Zehnerpotenzen abgestuft durch Nebenschlüsse zum Galvanometer, außerdem ist ein Kurzschluß für

[1]) Vorschriften und Normen des V. D. E., Berlin, Julius Springer 1923, S. 89.

Digitized by Google

dasselbe vorzusehen, um es bei ganz schlechten Isolierstoffen vor Überlastung zu schützen. Um in diesem Falle den Strom zu begrenzen, schaltet man einen Schutzwiderstand der Spannungsquelle vor, z. B. 10000 Ω aus 0,1 mm starken Manganindraht unifilar auf ein Porzellan- oder Glasrohr von etwa 6 cm Durchmesser und 50 cm Länge aufgewickelt. Mißt man die Spannung v hinter dem Widerstande mit einem statischen Voltmeter und fällt dieses beim Anlegen des Prüflings merklich ab auf v', so ist der Widerstand des Prüflings nur $\frac{1}{100} \cdot \frac{v'}{v - v'}$ Megohm und braucht nicht mit dem Galvanometer gemessen zu werden.

Als Spannungsquelle benutzt man bei niedrigeren Spannungen zweckmäßig eine Akkumulatorenbatterie. Für die Messung des Oberflächenwiderstandes an kleinen Proben empfiehlt sich die Anwendung höherer Spannung, 1000 V.-Batterien aus kleinen Akkumulatoren für diese Spannung erfordern sehr hohe Instandhaltungskosten, einfacher auch in der Handhabung ist eine kleine Gleichspannungsmaschine oder ein Transformator mit Glaskolbengleichrichter wie sie im Postbetriebe für die Erzeugung der Anodenspannung bei Glühkathodensenderöhren gebraucht werden.

Da mit dem Galvanometer sehr kleine Ströme gemessen werden sollen, ist es notwendig, die Anordnung so aufzustellen, daß keine Fremdströme in das Galvanometer fließen können. Dies durch vortreffliche Isolation des Galvanometers und der Leitungen erreichen zu wollen, ist wenig zuverlässig; Verstauben und Beschlagen mit Feuchtigkeit bei Temperaturänderungen lassen unter Umständen die Isolationen der Anordnungen sinken, so daß die darüber ins Galvanometer kriechenden Ströme dem über den hochisolierenden Prüfling fließenden Strom gleichkommen oder ihn weit übertreffen. Ein unbedingt zuverlässiges Mittel ist es, die unerwünschten Ströme durch Metallflächen abzufangen, insbesondere die isolierte Leitung zum Galvanometer mit einer Metallhülle zu umgeben und das Galvanometer sowie den Nebenschlußkasten mit Isolierfüßchen auf ein Blech zu stellen; diese Metallflächen sind direkt mit dem Pol der Spannungsquelle, an der das Galvanometer liegt, zu verbinden.

Besonders einfach läßt sich diese Maßregel durchführen, wenn der Pol der Spannungsquelle, an der das Galvanometer liegt, geerdet wird, dann sind die Schutzhüllen und Bleche ebenfalls zu erden. Abb. 4 zeigt eine solche Anordnung zur Messung des Oberflächenwiderstandes, wie sie vom Verbande deutscher Elektrotechniker in den Prüfvorschriften für die Untersuchung von Isolierstoffen vorgeschrieben ist.

Die Schutzmaßnahme ist aber auch möglich — bisher allerdings wohl selten angewendet — in Anlagen, wo der andere Pol der Span-

Digitized by Google

nungsquelle geerdet ist, so daß das Galvanometer auf Spannung gegen Erde gebracht wird. Das kommt vor in Anlagen, wo neben Isolationsmessungen auch noch der Ladestoß im Kabel zur Bestimmung der Kapazität mit dem Galvanometer ballistisch gemessen werden soll. Die Schutzhüllen und Schutzbleche sind hier nochmals gegen Erde zu isolieren und mit dem nicht an Erde liegenden Pol der Spannungsquelle zu verbinden; dieser Schutz ist dann eben so zuverlässig wie in dem ersten Fall der Erdung.

Beim Anlegen der Spannung schließt man zunächst das Galvanometer kurz, damit es nicht durch den Verschiebungsstromstoß einen ballistischen Ausschlag bekommt, dann hebt man den Kurzschluß auf und steigert mit dem Nebenschluß schrittweise die Empfindlichkeit des Meßinstrumentes, bis man einen Ausschlag hinreichender Größe bekommt; dieser Ausschlag geht mit der Zeit mehr oder weniger zurück infolge des Abklingens des Nachwirkungsstromes. Es würde zu

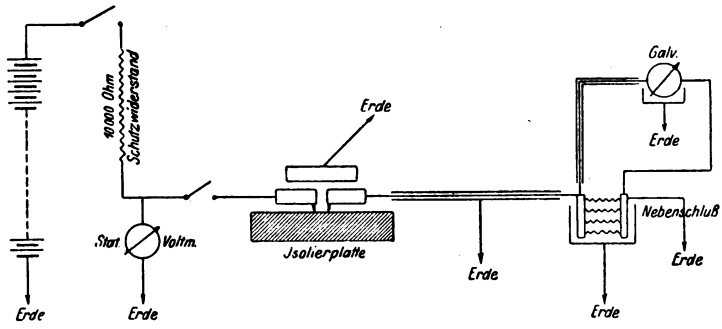


Abb. 4. Anordnung zur Messung des Oberflächenwiderstandes.

zeitraubend sein, jedesmal durch fortlaufende Ablesungen festzustellen, wann derselbe vollständig abgeklungen ist, es ist üblich 1 Minute nach dem Anlegen der Spannung den Ausschlag abzulesen und durch Division der diesem Ausschlag entsprechenden Stromstärke in die Spannung den gesuchten Widerstand zu berechnen; dieser wird in Megohm (= Millionen Ohm) angegeben.

Das Galvanometer eicht man, indem man an Stelle des Isolierstoffes einen Drahtwiderstand von 100000 Ω einschaltet und bei geeignetem Nebenschluß den Galvanometerausschlag abliest. Den Widerstand wickelt man unifilar aus 0,05 mm starkem besponnenen Manganindraht in fünf Abteilungen auf einen Holzdorn, damit nicht die Bespinnung durchschlagen wird; es genügt eine Abgleichung des Widerstandes auf 3 %.

Ist der Durchgangs- oder Oberflächenwiderstand so hoch, daß man im Galvanometer keinen Ausschlag erhält, so kann man ihn in der

Digitized by Google

Weise ermitteln, daß man die durch ihn fließende Elektrizitätsmenge elektrostatisch aus der Zu- oder Abnahme der Ladung eines Elektrometers oder Elektroskops bestimmt. Doch kommt diese Messung für technische Zwecke kaum in Frage und braucht hier nicht erörtert zu werden.

5. Der Verschiebungsstrom bei Gleichspannung.

Die Elektrizitätsmenge, welche beim Anlegen der Gleichspannung an die Belegungen des Isolierstoffes — die einen Kondensator darstellen — in dem Verschiebungsstromstoß fließt, ist gleich dem Produkt aus der Spannung und der Kapazität; mißt man den ballistischen Ausschlag, den das Galvanometer durch den Stromstoß erhält und vergleicht ihn mit dem Ausschlag bei der Ladung eines Kondensators bekannter Kapazität bei derselben Spannung, so kann man die Kapazität des Isolierstoffkondensators berechnen. Ist die geometrische Konfiguration desselben derart, daß sich seine Kapazität bei Luft als Dielektrikum berechnen läßt, so ergibt sich die Dielektrizitätskonstante ε des Isolierstoffes als das Verhältnis der Kapazität mit Isolierstoff zu der mit Luft.

Damit der Nachwirkungsstrom nicht den Galvanometerausschlag vergrößert, darf man die Spannungsquelle nur sehr kurze Zeit anlegen; einen geeigneten Schalter hierfür hat Seleny[1]) angegeben. Andererseits darf die Kontaktzeit auch nicht so kurz sein, daß die Kapazität über die Widerstände nur unvollkommen aufgeladen wird.

Nach dieser Methode der Kapazitätsbestimmung wurden früher Schwachstromkabel geprüft, jetzt wird sie durch Messung mit der Wechselstrombrücke verdrängt.

Wird mit einem rotierenden Unterbrecher die Kapazität von der Gleichspannung viele Male in der Sekunde rhythmisch abwechselnd über das Galvanometer aufgeladen und direkt entladen (oder umgekehrt) so erhält man einen dauernden Ausschlag des Galvanometers[2]). Die damit verbundene starke Empfindlichkeitssteigerung gestattet bei niedriger Gleichspannung sehr kleine Kapazitäten zu messen und dadurch die Dielektrizitätskonstante bei kleinen Probestücken zu ermitteln.

6. Der dielektrische Verlust bei Wechselspannung.

Dem Energieverlust, der in einem Isolierstoff bei Beanspruchung mit Wechselspannung entsteht wurde in prüftechnischer Hinsicht zunächst nur beim Fernsprechwesen Beachtung geschenkt. Hier machte er sich in den Kabeln und Apparaten durch Dämpfung der Fernsprechströme störend bemerkbar. Man fand, daß bei Wechselspannung die

[1]) Phys. Rev. 22. 1906. S. 65.
[2]) Giebe: Z. Instrumentenk. 1909, S. 205.

Digitized by Google

Verlustkomponente (vgl. 1, 6) des Wechselstroms ganz außerordentlich viel größer war, als der Leitungsstrom durch den Isolierstoff bei einer gleich hohen Gleichspannung. Man verglich in der gleicharmigen Wechselstrombrücke bei der mittleren Frequenz der Telephonströme (800 per/s, Kreisfrequenz $\omega = 5000$), die von den Leitern und dem Isolierstoff gebildete Kapazität mit einer gleich großen verlustfreien Kapazität C (Luftkondensator), der man einen passenden Widerstand r in Reihe schaltete, bis das als Nullinstrument dienende Telephon stromlos wurde. Die Größe $r\omega C = \mathrm{tg}\delta$ gibt das Verhältnis des Verluststromes zum Blindstrome.

In der Starkstromtechnik begann man sich bei der Kabelfabrikation für den dielektrischen Verlust zu interessieren, als die Entwicklung zur Anwendung immer höherer Betriebsspannungen drängte. Man maß bei Hochspannung mit Telephonfrequenz in der Wechselstrombrücke (Monasch) oder bestimmte mit einem hochempfindlichen Wattmeter (Humann, Höchststätter) direkt die Verlustenergie des Ladestromes. Hierbei ergab sich die auffällige Tatsache, daß bei verseilten Kabeln der Verlust bei höheren Spannungen nicht — wie bei konstanter Ableitung es zu erwarten wäre — mit dem Quadrat der Spannung wächst, sondern schneller. Die Wattmetermethode gibt nur bei längeren Kabelstücken genügend große Ausschläge, es macht Schwierigkeiten den Strom in der Spannungsspule mit der erforderlichen hohen Genauigkeit der Hochspannung phasengleich zu machen, namentlich bei sehr hohen Spannungen; harmonische Oberwellen in der Spannungskurve vermehren den gemessenen Verlust. Um bei kleinen Proben, z. B. Hartpapierrohren eine Vorstellung über die Höhe der Verluste zu gewinnen, beobachtete man die Erwärmung des Isolierstoffs bei Dauerbeanspruchung mit erhöhter Spannung.

Die Entwicklung der unten beschriebenen Brückenmethode in der der PTR wurde durch folgende Beobachtung veranlaßt. Zur Prüfung eingesandte kurze Proben von Kabeln, die während des Rohstoffmangels im Kriege hergestellt waren und nach der Verlegung bei der Betriebsspannung immer wieder nach kurzer Zeit durchschlagen wurden, hielten die vom VDE vorgeschriebene Prüfung mit dem doppelten der Betriebsspannung und mehr nicht nur die vorgeschriebene 1 Minute sondern 1 Stunde lang anstandslos aus. Hierbei wurden sie aber warm. Eine Messung mit einer improvisierten Kompensationsmethode mit dem Vibrationsgalvanometer als Nullinstrument bei 50 per/s zeigte, daß bei der Betriebsspannung der Ladestrom einen sehr großen Leistungsfaktor hatte, der mit der Zeit auf $\cos\varphi = 0{,}3$ anwuchs. Es war klar, daß ein solches Kabel die Hochspannung nicht lange aushalten konnte, sondern durch innere Erhitzung zugrunde gehen mußte.

Digitized by Google

7. Die Verlustmeßbrücke für Hochspannung[1]).

Abb. 5 zeigt die Brückenschaltung. Der Hochspannungstransformator ist einseitig geerdet.

Zwischen Hochspannung und Erde liegt einmal die zu untersuchende mit dielektrischem Verlust behaftete Kapazität C_1 in Reihe mit einem Schleifdraht $S = 0{,}2\,\Omega$ und dem regelbaren Widerstand R_3 und zweitens ein verlustfreier Vergleichskondensator C_2 in Reihe mit dem Widerstand R_4. Das Vibrationsgalvanometer als Nullinstrument liegt zwischen dem Schleifkontakt und der Verbindungsstelle von C_2 mit R_4. Nach Erregen der Hochspannung kann man den Ausschlag des Nullinstrumentes durch Regeln von R_3 auf ein Minimum bringen. Ganz auf Null läßt sich der Ausschlag nur dadurch bringen, daß die Phasenverschiebung im Brückenzweige 1, welche durch den dielektrischen Verlust bedingt ist, in einem der anderen drei Brückenzweige kompensiert wird. Bezeichnen φ_1, φ_2, φ_3, φ_4 die Phasenwinkel der vier Brückenzweige, so muß für die Stromlosigkeit des Nullinstruments die Bedingung erfüllt sein

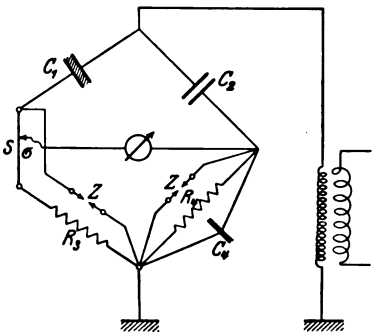


Abb. 5. Verlustmeßbrücke für Hochspannung.

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Bei den früher erwähnten Brückenschaltungen wurde das dadurch erreicht, daß C_2 ein passender Widerstand in Reihe geschaltet wurde. Da aber der verlustfreie Vergleichskondensator für hohe Spannungen nur mit kleiner Kapazität hergestellt werden kann, müßte der ihm bei 50 per/s in Reihe zu schaltende Widerstand eine Million Ohm und mehr betragen, das Regeln desselben wäre gefährlich.

Die Phasenabgleichung wird nun dadurch erzielt, daß eine regelbare Kapazität C_4 dem Widerstande R_4 parallel geschaltet wird. Mit dem Schleifkontakt wird die Feinabgleichung des Widerstandes im Brückenzweige 3 vollzogen. Es ist dann bei der Kreisfrequenz ω

$$\delta_1 = 90^\circ - \varphi_1 = \varphi_4$$
$$\operatorname{tg} \delta_1 = \operatorname{cotg} \varphi_1 = \operatorname{tg} \varphi_4 = R_4\, \omega C_4.$$

δ_1 ist der Winkel, um den der Phasenwinkel φ_1 des mit Verlust behafteten Kondensators von 90° abweicht: der Verlustwinkel. Er ist eine das dielektrische Verhalten des Materials kennzeichnende Größe.

[1]) Schering: Z. Instrumentenk. 1920, 40 S. 124; Semm: ebenda u. Arch. Elektrot. 1920, S. 30. Schering u. Dieterle: Z. Instrumentenk. 1921, S. 139.

Digitized by Google

$tg\delta = cotg\ \varphi_1$ ist bis zu Werten 0,08 bis auf 0,2% gleich $\cos\varphi_1$, dem Leistungsfaktor des Ladestromes; im allgemeinen handelt es sich um sehr viel kleinere Werte. In der Starkstromtechnik bürgert es sich ein, den der Anschauung geläufigen Leistungsfaktor $\cos\varphi$ als Kenngröße des dielektrischen Verhaltens eines Stoffes anzugeben, während in der Schwachstromtechnik vielfach der Winkel δ in Minuten benutzt wird.

Bei der in Deutschland vorwiegend üblichen Starkstromfrequenz 50 per/s ist $\omega = 100\pi$, gibt man dem Widerstand R_4 den Wert $\frac{1000}{\pi}$, so ist der $\cos\varphi$ gleich $\frac{1}{10}$ der in Mikrofarad abgelesenen Kapazität C_4. Es bedarf also zur Auswertung der Messung keiner Rechnung. Als veränderliche Kapazität C_4 ist bequem ein Dreidekaden-Kurbelkondensator von Siemens & Halske mit $9 \times 0{,}1$; $9 \times 0{,}01$; $9 \times 0{,}001\,\mu$F.

Die der Blindkomponente des Stromes entsprechende Kapazität C_1 berechnet sich zu

$$C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3 + \sigma},$$

darin ist σ der auf dem Schleifdraht abgegriffene nach R_3 zu liegende kleine Widerstand.

Die hohe Empfindlichkeit der neueren Vibrationsgalvanometer[1]) für technische Frequenz gestattet den Leistungsfaktor auch bei kleinen Kapazitäten, kurzen Kabelstücken, Durchführungsisolatoren, Nutenisolierrohren für Maschinen u. dgl. zu messen. Durch geerdete Schutzringe müssen — wie bei der Isolationsmessung mit Gleichstrom — Kriechströme und Gleitfunken über die Enden abgefangen werden. Zwei Luftleerblitzableiter Z von Siemens & Halske, wie sie als Feinschutz für Fernsprechleitungen benutzt werden, sind parallel zu den Brückenwiderständen nach Erde gelegt, um den Beobachter und die Anordnung vor dem Übertritt von Hochspannung zu schützen. Sie wirken so zuverlässig, daß man während der Messung die Spannung bis zum Durchschlag steigern kann.

Als Vergleichskondensator C_2 dient für Spannungen von 7 bis 120 kV ein Luftzylinderkondensator nach Petersen[2]) von etwa $50\,\mu\mu$F[3]) Kapazität (Abb. 6), der äußere Zylinder liegt an der Hochspannung, das Mittelstück des Innenzylinders an dem Schleifdraht S, die Enden des Innenzylinders an Erde. Für Spannungen von 1 bis 20 kV wird eine Minosflasche von Schott und Genossen in Jena von etwa $1000\,\mu\mu$F

---

[1]) Zöllich: Arch. Elektrot. 1915, 3, S. 369; Schering und Schmidt: ETZ., Z. Instrumentenk. 1918, 38, S. 1.

[2]) Petersen: Hochspannungstechnik 1911, S. 16ff.

[3]) $1\,\mu\mu$F = 1 Millionstel Mikrofarad = 0,9 cm.

Digitized by Google

(Abb. 7) verwendet. Bei dieser ist von der äußeren Belegung durch Aussätzen eines schmalen Ringstreifens ein Schutzring abgetrennt, der geerdet wird, der übrige Teil der äußeren Belegung wird mit R_4 verbunden, an die innere Belegung wird die Hochspannung gelegt. Um eine wohldefinierte Kapazität zu haben, empfiehlt es sich, die Flasche in ein geerdetes Gehäuse zu setzen und die Leitung zu R_4 wenigstens in der Nähe der Hochspannung in einem geerdeten Rohr, etwa in einem Papierrohr mit gefalztem Metallmantel (Isolierrohr) von 23 mm Weite zu führen. Die Kapazität dieser Leitung gegen die geerdete Hülle liegt parallel der Kapazität C_4, sie soll daher 0,001 μF nicht überschreiten, damit sie zu vernachlässigen ist, die Leitung darf daher nicht als Kabel oder Panzerader verlegt werden. Ebenso ist zweckmäßig, die Leitung von C_1 zum Schleifdraht zu schützen.

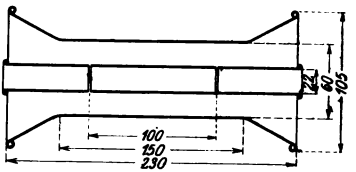


Abb. 6. Luftkondensator nach Petersen.

Die zweckmäßigste Form der Probekörper für die Bestimmung des Leistungsfaktors bei festen Isolierstoffen bei Hochspannung ist das zylindrische Rohr oder ein zylindrisches Gefäß mit kugelförmigem Boden, etwa in der Form der Minosflaschen. Als innere Belegung, die an die Hochspannung gelegt wird, verwendet man einen passenden Metalldorn oder Wasserfüllung, als äußere Belegung eine dicht aufliegende Bewickelung oder Beklebung mit Stanniol, noch besser ist ein aufgespritzter Metallüberzug. An den Enden der äußeren Belegungen werden Schutzringe angebracht, um die Kriechströme abzufangen.

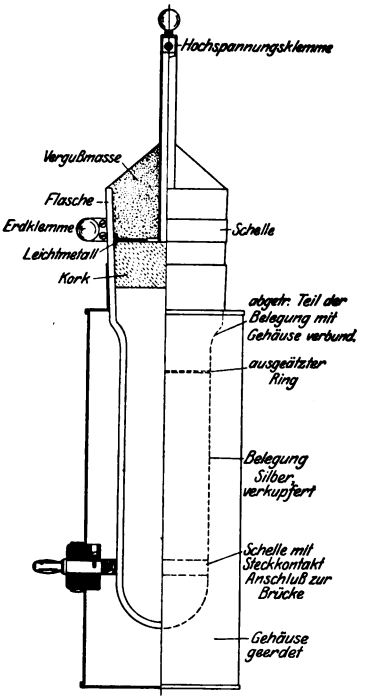


Abb. 7. Minosflasche.

Zur Untersuchung von Flüssigkeiten, z. B. Tränkölen für Kabel auf dielektrische Verluste, verwendet man einen Zylinderkondensator. Es ist zweckmäßig den äußeren Zylinder einseitig zu schließen, so daß er gleichzeitig das Gefäß für die Flüssigkeit bildet und den inneren Zylinder mit Schutzenden wie beim Petersenkondensator herzustellen. Der äußere Zylinder wird an Hochspannung gelegt.

Digitized by Google

8. Der Leistungsfaktor als Maß der Eignung des Isolierstoffs bei Hochspannung.

Mißt man in der beschriebenen Anordnung an verschiedenen Isolierstoffen den Leistungsfaktor bei schrittweise steigender Spannung, so bleibt bei einigen der $\cos\varphi$ unverändert, bei anderen wächst er von einer gewissen Spannung an mehr oder weniger stark mit der Spannung. Als mögliche Ursachen für das letztere auffällige Verhalten können bei geschichteten Isolierstoffen angeführt werden: kleine Hohlräume im Inneren, ungeeignete Tränk- oder Bindemittel, ungenügende Trocknung. Aber damit ist die Frage nicht abgetan, auch bei keramischen Stoffen wurde das Ansteigen des $\cos\varphi$ mit der Spannung beobachtet, diese geben dann auch bei dem Durchschlagsversuche unregelmäßige und niedrige Durchschlagswerte, während bei bewährten Porzellanen der Leistungsfaktor bis zu hohen Spannungen seinen kleinen Wert unverändert behielt. Wir wissen leider noch recht wenig von den Vorgängen im Dielektrikum bei hohen Spannungen, hier hat die physikalische und die technische Forschung noch ein weites Feld.

Aus der Erfahrung kann man aber sagen, daß Isolierstoffe, bei denen der Leistungsfaktor des Ladestromes mit steigender Hochspannung zu hohen Werten (etwa 0,03) ansteigt, für diesen Spannungsbereich nicht geeignet sind. Bei diesem Leistungsfaktor ist übrigens eine Erwärmung des Isolierstoffs durch die Verluste bei Spannungen bis 30000 V nicht merklich, wenn nicht die Wärmeabgabe an die Umgebung künstlich durch wärmeisolierende Umhüllung unterdrückt wird. Wie man aus dem Beispiel des Kabels in Kapitel 6 sah, ist die Messung des Leistungsfaktors bei Isolierstoffen für Hochspannung eine wertvolle Ergänzung der Spannungsprobe und des Durchschlagversuchs, ein wesentlicher Vorteil ist, daß das Objekt dabei nicht zerstört wird.

9. Der Durchschlag fester Stoffe.

Steigert man die Spannung zwischen den leitenden Belegungen eines Isolierstoffes allmählich, so wird derselbe schließlich an einer Stelle durchschlagen und zwar an der schwächsten Stelle, wenn die Beanspruchung eine gleichmäßige ist, sonst an der Stelle stärkster Beanspruchung, des größten Spannungsgefälles.

Bringt man eine gute Isolierplatte zwischen zwei kreisförmige Metallplatten als Elektroden, so tritt bei Steigerung der Spannung der Durchschlag meist außen an der Kante der Elektroden ein; an der Kante ist das Spannungsgefälle am größten. Klebt man zwei kreisförmige Stanniolblätter als Elektroden auf die Isolierplatte und bringt diese unter Öl, so tritt der Durchschlag wieder an der Kante, aber bei niedrigerer Spannung als vorhin ein, die Kanten sind noch schärfer,

Digitized by Google

die Glimmentladung an den Kanten, welche im ersten Falle wie eine Vergrößerung der leitenden Elektrode wirkt, wird durch das Öl unterdrückt. Noch niedriger fällt die Durchschlagspannung der Isolierplatte zwischen einer Spitze und einer Platte als Elektroden unter Öl aus.

Eine definierte Bestimmung der Durchschlagspannung an einer Platte kann man nur erzielen, wenn man in der Oberseite derselben eine schalenförmige Vertiefung (Abb. 8) aushöhlt, die mit Quecksilber gefüllt wird, welches die eine Elektrode bildet, während die andere eine größere Metallplatte auf der Unterseite der Isolierplatte ist. Dann tritt der Durchschlag an der dünnsten Stelle der Platte ein, wenn nicht Poren oder dergleichen Fehler vorhanden sind. Es kann dann die Durchschlagspannung für diese Schichtdicke angegeben werden.

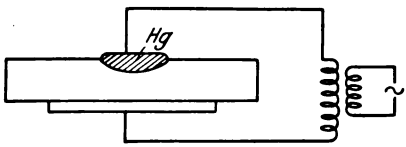


Abb. 8. Durchschlag fester Stoffe.

Bei bearbeitbaren Isolierstoffen wird man die Vertiefung ausdrehen, bei nicht bearbeitbaren, wie Glas, ausschleifen, bei keramischen Stoffen das Probestück gleich in entsprechender Form herstellen.

Da sich mit dem Transformator Hochspannung bequem erzeugen läßt, benutzt man zu dieser Prüfung Wechselspannung. Bei dieser gehen von den Elektroden auf die Oberfläche der Isolierplatte Ladefunken aus, welche die Isolierplatte erhitzen und leicht den Überschlag um den Plattenrand einleiten, wenn die Platte nicht sehr groß ist. Durch Eintauchen der Platte in Öl werden diese Funken unterdrückt Um nicht Zufallswerte zu erhalten, ist es notwendig, an mindestens vier gleichartigen Probestücken die Durchschlagspannung zu bestimmen.

Die Höhe der Durchschlagspannung hängt vielfach von der Geschwindigkeit der Spannungssteigerung ab; bei schnellem Hochgehen mit der Spannung erhält man dann höhere Durchschlagswerte als bei langsamer Steigerung. Diese Erscheinung beruht auf der Einwirkung des dielektrischen Verlustes auf die Durchschlagspannung. Bei Isolierstoffen mit starken Verlusten kommt es bei langsamer Steigerung der Spannung bisweilen gar nicht zu einem plötzlichen Durchbruch, sondern die Stromstärke wächst immermehr an, während die Platte sich erhitzt, schließlich wird sie durchgeschmort.

Im allgemeinen richtet man die Geschwindigkeit der Spannungssteigerung nach einem Vorversuch so ein, daß der Durchschlag etwa 1 Minute nach dem Anlegen der Spannung erzielt wird.

Die Durchschlagprüfung ermöglicht bequem und schnell Isolierstoffe mit niedriger Durchschlagspannung zu erkennen und als ungeeignet für Hochspannung auszuscheiden. Sie vermag jedoch für sich allein nicht festzustellen, daß ein Isolierstoff für Hochspannung geeignet ist,

Digitized by Google

sie muß ergänzt werden durch eine langdauernde Beanspruchung des Isolierstoffes mit einer etwas unterhalb der ermittelten Durchschlagspannung liegenden Spannung oder durch die Messung des Leistungsfaktors des dielektrischen Verlustes.

10. Der Durchschlag flüssiger Stoffe.

Bei schmelzbaren und flüssigen Isolierstoffen wird die Durchschlagspannung zwischen zwei Kugeln oder nach Petersen[1]) zwischen zwei konzentrischen Zylindern bestimmt. Bei letzteren ist das Feld nahezu homogen und die Durchbruchsfeldstärke oder Durchschlagsfestigkeit in kV/cm einfach zu berechnen, doch ist der Wert dieser Größe bei unserer geringen Kenntnis von dem Wesen des Durchschlags problematisch. Bei Kugeln ist die Anordnung einfacher und der Abstand läßt sich leicht für bestimmte Werte einstellen. Stahlkugeln aus Kugellagern eignen sich hierfür besonders, da sie Kugelgestalt und vorgeschriebenen Durchmesser genau einhalten. Abb. 9 zeigt ein in der PTR. ausgebildetes Ölprüfgefäß mit Stahlkugeln von 12,5 mm Durchmesser, deren Abstand mit der Mikrometerschraube eingestellt und an der Teilung abgelesen werden kann. Das Gefäß wird von einem Hartgummirahmen und zwei Glasscheiben gebildet. Auch zwischen Kugeln läßt sich die größte Feldstärke, die in der Richtung der Zentrale liegt, berechnen[2]). Hier sei nur angeführt, daß man bei Kugeln von 12,5 mm Durchmesser, um die größte Feldstärke, die Durchschlagsfestigkeit in kV/cm zu erhalten, die Durchschlagspannung multiplizieren muß:

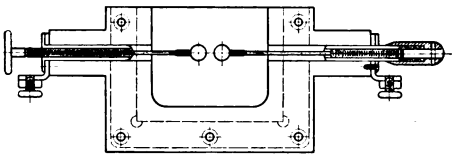


Abb. 9. Ölprüfapparat.

bei einem Kugelabstand von 3 mm mit 3,92;
„ „ „ „ 5 mm mit 2,62.

Die Durchschläge fallen nicht sehr regelmäßig aus, man muß daher eine größere Anzahl von Durchschlagsbestimmungen vornehmen, etwa 9 bei dreimaligem Erneuern der Ölmenge. Um ein zu starkes Verrußen des Öles beim Durchschlag zu verhindern, schaltet man in den Primärkreis des Transformators ein dünnes Widerstandsdrähtchen, das beim Durchschlag abschmilzt.

Berechnet man aus Durchschlagsreihen bei 3 mm und 5 mm Abstand die Durchschlagsfestigkeit in kV/cm, so ergibt sich aus beiden Reihen nicht immer derselbe Wert, es kommen Unterschiede von über 10% vor und zwar in wechselnder Richtung.

[1]) Petersen: Hochspannungstechnik 1911, S. 49.

[2]) Peek, Proc. AIEE. 1914, S. 889, Estorff, ETZ. 1916, S. 60 u. 76 (vgl. auch Abschn. 12).

Digitized by Google

In den kürzlich von der Isolierstoffkommission des VDE ausgearbeiteten Prüfvorschriften[1]) für Schalter- und Transformatorenölen sind als Elektroden Kupferkalotten von 25 mm Radius nach Abb. 10 in 3 mm Abstand gewählt. Der Abstand der Kalottenränder von der Gefäßwandung soll mindestens 12 mm betragen. Um die Durchschlagfestigkeit in kV/cm zu erhalten ist die ermittelte Durchschlagspannung mit dem Faktor 3,5 zu multiplizieren.

Früher wurden auch Spitzen als Elektroden verwandt, in unmittelbarer Nähe der Spitzen ist das Spannungsgefälle sehr groß, das Feld ist sehr ungleichmäßig, die Verhältnisse lassen sich nicht übersehen, Spitzen sind daher ungeeignete Elektroden.

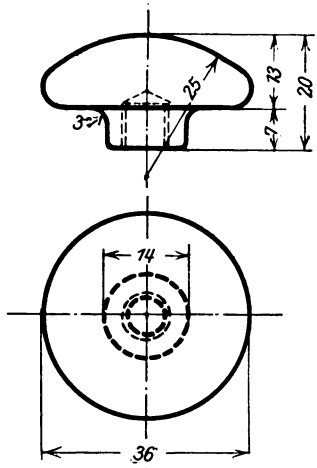


Abb. 10.

Bei Ölen findet man entgegengesetzt wie bei festen Stoffen bei langsamer Steigerung der Spannung höhere Durchschlagswerte als bei schneller; die Spannung bewirkt eine dielektrische Reinigung, suspendierte Teilchen kleinerer Dielektrizitätskonstante als der des Öles werden aus dem Felde getrieben.

Die Durchschlagspannung von Ölen ist ganz außerordentlich abhängig von Feuchtigkeit und Verunreinigungen. Bei sehr weitgehender Trocknung und Filtration erhält man ganz außerordentlich hohe Werte der Durchschlagsfestigkeit der Öle, diese Bestimmung hat aber wenig praktische Bedeutung, da die Öle betriebsmäßig sich nicht in diesem Zustand erhalten lassen. Die Durchschlagsprobe ist ein sehr scharfes Reagenz auf den jeweiligen Reinheitsgrad des Öles und als solches von großer Bedeutung, eine Materialkonstante — wie etwa bei festen Stoffen — bestimmt man bei Ölen mit der Durchschlagspannung nicht.

11. Die Messung der Durchschlagspannung.

Der Eintritt des Durchschlags hängt von dem Scheitelwert der Wechselspannung ab, dieser ist aber der Messung weniger leicht zugänglich als der Effektivwert. Man gibt daher als Durchschlagspannung die Effektivspannung an. Bei Sinusform der Spannungskurve ist der Scheitelwert das $\sqrt{2}$fache des Effektivwertes, bei verzerrter Kurvenform kann der Scheitelfaktor größer oder kleiner als $\sqrt{2}$ sein. Damit

[1]) ETZ. 1923, S. 601. Die Vorschriften bedürfen noch der Genehmigung durch die Jahresversammlung des VDE.

Digitized by Google

die Angabe des Effektivwertes als Durchschlagspannung definiert ist, muß die Spannungskurve sinusförmig sein.

Der Generator soll daher eine Wechselspannung geben, die frei von Oberwellen ist, welche durch die Eisennuten entstehen können; vor allen Dingen muß seine Leistung so groß sein, daß der Magnetisierungsstrom des Hochspannungstransformators, der mindestens 3 kV A Leistung haben soll, nicht eine Verzerrung der Spannungskurven durch eine dritte Oberwelle hervorruft. Aus dem gleichen Grunde vermeidet man es auch, einen größeren Widerstand in den Primärkreis des Transformators, etwa zum Regeln der Spannung, zu nehmen. Doch ist die verzerrende Wirkung viel geringer als man im allgemeinen annimmt. Bedenklicher ist das Vorschalten einer Drosselspule, da hierdurch Resonanzphänomene eintreten können.

Beim Einschalten des Transformators kann sekundär kurzzeitig eine beträchtliche Spannungserhöhung eintreten, wenn im Augenblick des Kontaktmachens der Augenblickswert der Wechselspannung in der Nähe des Scheitelwertes liegt. Man muß daher bei niedriger Primärspannung einschalten und die Spannung nicht ruckweise in großen Sprüngen steigern. Am bequemsten ist die Spannungsregelung durch Ändern der Erregung des Generators. Speist man den Transformator aus einem Netz fester Spannung, so schaltet man einen Regel- oder Stufentransformator dazwischen.

Den Effektivwert der Hochspannung mißt man am genauesten mit einem Spannungswandler und dynamischen oder Hitzdraht-Voltmeter; elektrostatische Voltmeter, deren Meßbereich durch Vorschaltkondensatoren erweitert werden, kann man direkt an die Hochspannung legen. Vielfach genügt es, die Spannung auf der Primärseite zu messen und mit dem bekannten Übersetzungsverhältnis des Hochspannungstransformators zu multiplizieren, um die Hochspannung zu erhalten. Bei Transformatoren für sehr hohe Spannungen kommt es aber dabei zu Unstimmigkeiten. Man verfährt dann so, daß man die Primärspannung beim Überschlage einer hochspannungsseitig angelegten Kugelfunkenstrecke feststellt. Aus dem Abstand der Kugeln x und ihrem Radius R in cm kann man den Scheitelwert der Überschlagspannung nach Peek[1]) oder Estorff[2]) berechnen, dividiert man durch $\sqrt{2}$, so erhält man den Effektivwert E der Überschlagspannung der Funkenstrecke bei Sinusform der Spannungskurve. Mit dem Verhältnis dieser Überschlagspannung zur abgelesenen Primärspannung ist dann als Übersetzungsverhältnis zu rechnen. Durch diesen Bezug der zu bestimmenden Durchschlag- oder Überschlagspannung auf die be-

[1]) Peek, Proc. AIEE. 1914, S. 889.

[2]) W. Estorff, ETZ. 1916, S. 60.

Digitized by Google

rechenbare Überschlagspannung der Funkenstrecke eliminiert man Fehler, welche durch Verzerrung der Kurvenform und durch die Änderung des Übersetzungsverhältnisses infolge des Kapazitätsstromes in dem Prüfling entstehen. Man muß daher die Funkenstrecke dem Prüfling auch nach vollzogener Eichung parallel geschaltet lassen und die Kugeln so weit voneinander entfernen, daß der Durch- oder Überschlag an dem Prüfling und nicht mehr zwischen den Kugeln eintritt. Im folgenden Kapitel ist kurz die Berechnung der Überschlagspannung der Kugelfunkenstrecke nach Peek und dessen Vorschriften über die Anwendung der Funkenstrecke wiedergegeben. Die Formeln und Kurven von Estorff geben sehr nahe die gleichen Ergebnisse.

Es sei noch kurz erwähnt, daß Crewford ein Verfahren angegeben hat, die Scheitelspannung, wenigstens auf der Primärseite, direkt zu messen. Die Primärspannung wird über einen Glühkathodengleichrichter an einen Kondensator gelegt, dieser lädt sich bei Vermeidung von Fehlerquellen auf eine Gleichspannung auf, die der Scheitelspannung gleich ist und mit einem statischen Voltmeter gemessen werden kann.

Gerstmeyer u. Estorff[1]) legen an die Primärspannung über einen hohen Vorwiderstand ein Oscilloskop, eine Bandschleife mit Spiegelchen, die sich in einem starken Magnetfeld unter Öl befindet, ähnlich wie beim Oscillographen. Die Drehung des Spiegelchens ist dem Augenblickswert der Spannung proportional, die Breite des zu einem Lichtbande ausgezogenen Bildes, welches der Spiegel von dem Glühfaden auf der Mattscheibe entwirft, gibt daher die Scheitelspannung. Die Voraussetzung, daß Primär- und Sekundärspannung die gleiche Kurvenform haben, ist aber nicht immer erfüllt.

12. Die Kugelfunkenstrecke nach Peek.

Es sei

R Kugelradius in cm,

x Kugelabstand in cm,

E Überschlagspannung in kV effektiv, d. h. Scheitelspannung dividiert durch $\sqrt{2}$.

Dann ist

$$E = x \cdot \frac{g_s}{f} \text{ kV eff.}$$

g_s ist die Durchbruchfeldstärke der Luft, die sich berechnet nach der Formel

$$g_s = 19{,}3 \left[1 + \frac{0{,}54}{\sqrt{\delta R}}\right] \delta \cdot \text{kV eff.}$$

[1]) ETZ. 1916, S. 77.

Digitized by Google

Die Durchbruchfeldstärke hängt von der Luftdichte δ ab, diese wieder vom Barometerstand b in cm und der Lufttemperatur t in ° C; die Luftdichte ist hier 1 gesetzt für $b = 76$ cm, $t = 25°$, es ist

$$\delta = \frac{3{,}92\, b}{273 + t}.$$

Ferner ist der Nenner f in der ersten Gleichung gegeben durch

$$f = \frac{1}{4}\left[\frac{x}{R} + 1 + \sqrt{\left(\frac{x}{R} + 1\right)^2 + 8}\right].$$

Für g_s, δ und f sind nachstehend eine Anzahl Werte zusammengestellt, aus denen Kurven gezeichnet werden können.

für $\delta = 1$		δ				
R cm	g_s kV eff.	t °C	$b = 72{,}0$ cm	$b = 76{,}0$ cm	$\frac{x}{R}$	f
2,5	25,90	10	0,998	1,052	0,1	1,035
5,0	23,95	15	0,980	1,034	0,2	1,068
7,5	23,10	20	0,963	1,017	0,3	1,103
10,0	22,60	25	0,947	1,000	0,4	1,140
12,5	22,27	30	0,932	0,984	0,5	1,175
15,0	22,0	Trägt man b als Abszisse und δ als Ordinate auf, so ist für t = konst. die Kurve für δ eine gerade Linie.			0,6	1,212
20,0	21,65				0,7	1,250
					0,8	1,288
					1,0	1,367

f gilt für eine Kugelfunkenstrecke ohne Erdung, d. h. streng genommen für Erdung der Mitte des Transformators. Bei Erdung einer Kugel berechnet sich theoretisch ein anderes f, doch ist nach den Versuchen von Peek praktisch bis $\frac{x}{R} = 1$ das f für einseitig geerdete und ungeerdete Funkenstrecke auf 0,5 % gleich.

Der Kugelfunkenstrecke ist ein Wasserwiderstand von 1—4 Ohm für je 1 Volt vorzuschalten, bei nicht geerdeter Funkenstrecke ist jeder Kugel die Hälfte des Widerstandes vorzuschalten; bei einseitig geerdeter Funkenstrecke ist der Gesamtwiderstand der ungeerdeten Kugel vorzuschalten. Dieser Widerstand dämpft die beim Überschlag entstehenden Wanderwellen, welche sonst mit ihrer erhöhten Spannung den parallel geschalteten Prüfling gefährden würden.

Der Durchmesser der Kugelstützen darf nicht größer als $^1/_5$ des Kugelradius sein. Metallringe, durch welche die Stützen gehen, sollen so klein als möglich sein und der Kugel nicht näher kommen, wie die Funkenstrecke lang ist. Fremdkörper sollen einen Abstand von mehr als dem doppelten Kugeldurchmesser haben. Bei nicht geerdeter Funkenstrecke soll der Aufbau möglichst symmetrisch sein, bei einseitig geerdeter wirken Fremdteile besonders stark in der Nachbarschaft der nicht geerdeten Kugel.

Digitized by Google

Der Kugeldurchmesser soll nach Peek nicht um mehr als 0,1 % variieren und die mit dem Sphärometer gemessene Krümmung nicht mehr als 1 % von der Krümmung der wahren Kugel des verlangten Durchmessers abweichen.

13. Die Spannungsprobe.

Bei festen Isolierstoffen bedingt das Steigern der Spannung bis zum Durchschlag ein Opfern des Prüflings. Bei einer Materialprüfung an besonders hergerichteten Prüfkörpern spielt das keine Rolle, bei der laufenden Prüfung von Fertigteilen für Hochspannung steigert man die Wechselspannung nur auf das Doppelte bis Dreifache der betriebsmäßig in Frage kommenden Spannung und hält sie eine gewisse Zeit auf dieser Höhe. Bei geschichteten Isolierstoffen — Papier und Faserstoffen — ist Vorsicht geboten, eine zu hohe Spannung oder eine lange Dauer der Spannungsprobe kann durch die dielektrischen Verluste das Objekt schädigen, ohne daß man bei der Prüfung etwas davon merkt; man beschränkt daher die Dauer meist auf 1 Minute. Auch muß man darauf achten, daß nicht dabei an irgendeiner Stelle Überschläge eintreten, welche Sprungwellen von stark erhöhter Spannung erzeugen, die einen Durchschlag herbeiführen können.

Bei Körpern aus keramischen Stoffen dagegen dehnt man die Spannungsprobe auf $^1/_2$ Stunde aus, da hierbei nur fehlerhafte Stücke durchschlagen werden, und geht mit der Prüfspannung bis dicht an die Überschlagspannung heran.

Neuerdings beginnt auch die Spannungsprobe mit hoher Gleichspannung, die durch Aufladen eines Kondensators von einem Hochspannungstransformator über einen Gleichrichter erzeugt wird, in Aufnahme zu kommen, z. B. bei Hochspannungskabeln [1]). Bei Gleichspannung treten keine dielektrischen Verluste auf, man kann daher ohne Gefahr der Schädigung mit der Gleichspannung höher gehen, um die Widerstandsfähigkeit gegen die im Betriebe etwa auftretenden Wanderwellen zu prüfen. Bei Porzellankörpern gibt man die Gleichspannung schlagartig auf den Prüfling; man kann ihn dadurch in Luft mit höheren Spannungen prüfen als mit Wechselspannung, bei letzterer ist die Höhe der anwendbaren Spannung begrenzt durch den Überschlag durch die Luft, wenn man nicht den Prüfling in Öl oder Preßluft setzt, bei dem Gleichspannungsschlag ist die Dauer der Einwirkung so kurz, daß eine erhebliche höhere Spannung dazu gehört, um die Glimmentladungen so auszubilden, daß ein Überschlag eintritt; mangelhafte Isolatoren, welche bei der Wechselspannungsprobe in Luft nicht erkannt werden, werden dabei zertrümmert. Im Betriebe würden

[1]) ETZ. 1922, S. 1466; AEG. Zeitschr., 1923, S. 1; Mitt. V. El.-Werke, 1923, S. 249.

Digitized by Google

solche mangelhafte Isolatoren durch Wanderwellen zerstört werden können.

Spannungsproben mit Sprungwellen[1]) nimmt man an Maschinen und Transformatoren vor, indem man bei mäßig erhöhter Betriebsspannung Überschläge an Kugelfunkenstrecken hervorruft.

Die Spannungsprobe mit Wechselspannung von einigen tausend Volt wird wegen ihrer außerordentlich einfachen und bequemen Ausführung auch in großem Umfange bei der Prüfung von Installationsmaterial für Niederspannung verwendet. Teils hat sie die Messung der Isolationsmessung, z. B. bei Leitungen, wie bereits erwähnt, abgelöst, teils dient sie dazu, festzustellen, ob die Kriechwege zwischen spannungführenden Teilen groß genug sind oder ob der eingebaute Isolierstoff nach 24stündiger Einwirkung feuchter Luft intakt geblieben ist.

14. Prüfvorschriften für die Untersuchung elektrischer Isolierstoffe.

Schlechte Erfahrungen mit gepreßten Isolierstoffen bei Installationsmaterial für Niederspannung veranlaßten die Isolierstoffkommission des Verbandes deutscher Elektrotechniker im Jahre 1912, die Aufstellung von Prüfvorschriften für gepreßte Isolierstoffe in Angriff zu nehmen und hierzu das Staatliche Materialprüfungsamt in Berlin-Dahlem und die Physikalisch-Technische Reichsanstalt in Charlottenburg um ihre Mitwirkung zu bitten. Man war sich von vornherein darüber klar, daß es bei diesen Stoffen weniger auf hohe elektrische Eigenschaften, etwa großen Isolationswiderstand oder gar hohe Durchschlagspannung ankommt, als darauf, daß die Isolierfähigkeit nicht durch äußere Einflüsse vernichtet wird, daß die Haltbarkeit im weitesten Sinne hinreichend ist. Ein so hervorragend isolierender Stoff wie das gewöhnliche[2]) Hartgummi z. B. ist als Stecker unbrauchbar; hat ein Steckstift bei großer Stromentnahme schlechten Kontakt, so erwärmt er sich, das Hartgummi wird erhitzt und weich, es verliert seine Form, zieht man den Stecker heraus, so löst er sich unter Umständen in seine Bestandteile auf. Ist die Erhitzung stark, so kann das Hartgummi in Brand geraten und die Veranlassung einer Feuersbrunst werden. Fällt ein Hartgummistecker zu Boden, so zerspringt er leicht infolge seiner Sprödigkeit.

Andere Stoffe werden durch die Feuchtigkeit von Kellerräumen leitend, oder durch Ammoniakdampf von Viehställen oder schwefelsäurehaltiger Luft aus Akkumulatorenräumen angegriffen oder erweichen in Öl.

Es handelte sich zunächst um die Materialprüfung des Isolierstoffes in Normalformen, die für die Untersuchung besonders geeignet waren und zahlenmäßig definierte Ergebnisse lieferten. Für die mechanische

[1]) ETZ. 1922, S. 657 und 1442. — [2]) Wegen Eisen-Hartgummi vgl. S. 297 unten.

Digitized by Google

und Wärmeprüfung ist als Normalform ein Stab von 1,0 × 1,5 × 12,0 cm, für die elektrische Untersuchung eine Platte von 12 × 15 cm Fläche bei 1 cm Dicke gewählt. Eine große Zahl von verschiedenen Isolierstoffen wurden den genannten Prüfanstalten zur Untersuchung und zum Ausbilden neuer Methoden[1]) übergeben, wobei das Materialprüfungsamt die mechanischen und Wärmeuntersuchungen, die Reichsanstalt die elektrischen Untersuchungen übernahm.

Aus der großen Zahl der Versuchsarten wurden diejenigen ausgewählt, welche hinreichend und notwendig sind, um die Eigenschaften, welche bei der Verwendung des Isolierstoffes von Bedeutung sind, festzulegen. 1913 kamen die ersten Prüfvorschriften heraus, sie sind im Laufe der Jahre gemäß den damit gemachten Erfahrungen weiter entwickelt[2]).

Die Ergebnisse der Untersuchung sollten gleichzeitig eine Grundlage für eine Klassifizierung der Isolierstoffe geben, man hatte daher zuerst in Aussicht genommen, die Ergebnisse jedes Versuches in „Gütegraden" anzugeben, doch erwies sich dies bei den Festigkeitsprüfungen als unzweckmäßig, da die Festigkeitszahlen bei den verschiedenen Isolierstoffen für verschiedene Verwendungszwecke so weit auseinanderliegen, daß bei der Angabe der Ergebnisse in Gütegraden kleinere Unterschiede, die jedoch nicht ohne Bedeutung sind, verschwinden, namentlich würde für den Hersteller die Überwachung der Gleichmäßigkeit der Fabrikation durch die Prüfung nach Gütegraden nicht möglich sein, man kehrte deshalb zur Angabe der ermittelten Festigkeitswerte selbst zurück.

15. Die Biegefestigkeit.

Auf Zerreißung wird im allgemeinen Isoliermaterial der genannten Art nicht beansprucht, daher ist die Prüfung der Zerreißfestigkeit — im Gegensatz z. B. zu den amerikanischen Vorschriften — nicht vorgesehen. Die allgemeinste mechanische Beanspruchung des Isolierstoffes ist die auf Biegung. Die Anordnung der Prüfung auf Biegefestigkeit zeigt Abb. 11. Der Normalstab liegt mit seiner breiteren Fläche satt auf den Auflegern AA, deren Kanten bei ϱ mit 1 mm Krümmungsradius gebrochen sind, die Stützweite ist 100 mm. Auf die Mitte des Normalstabes drückt die zylindrische Druckfinne, welche

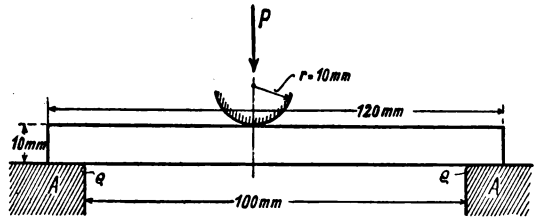


Abb. 11. Biegeprobe.

[1]) Passavant, Bericht über die Arbeiten der Isolierstoffkommission ETZ. 1912, S. 450. — [2]) Letzte Fassung ETZ. 1922, S. 446.

Digitized by Google

sich freiwillig satt auf die Stabfläche legen soll, mit der Kraft P. Diese Belastung P wird stufenweise, jedoch unter Vermeidung von Stößen, in Zeiträumen von 2 zu 2 Minuten gesteigert,

und zwar bis 300 kg/cm² um je 25 kg/cm²,
von 300 „ 700 „ „ „ 50 „
„ 700 kg/cm² aufwärts „ „100 „

Die Steigerung wird fortgesetzt, bis der Stab zu Bruch geht oder die Gesamtdurchbiegung in der Mitte, mit einem Millimetermaßstab gemessen, 5 mm erreicht. Neuerdings[1]) ist in Aussicht genommen, die Belastung nicht stufenweise, sondern mit gleichmäßiger Geschwindigkeit um 250 kg/cm² in der Minute zu steigern, bis der Bruch eintritt. Eine derartig gleichmäßig wachsende Belastung kann man z. B. herstellen, indem man als Belastungsgewicht ein Gefäß nimmt, in welches Wasser hineinläuft[2]). Dieses Verfahren ist einfacher und weniger zeitraubend als die stufenweise Beanspruchung.

Der Biegeversuch wird an fünf Probestäben im Anlieferungszustand bei Zimmertemperatur vorgenommen. Die Prüfung einer größeren Zahl von Proben ist notwendig, um einen von Zufälligkeiten nicht zu sehr beeinflußten Durchschnittswert zu erhalten.

Die Biegeprüfung wird noch angewendet, um die Beeinträchtigung der Festigkeit des Isolierstoffes durch Öle, welche als Schalt- und Schmieröle in elektrischen Anlagen vor- und auch in Berührung mit den Isolierstoffen kommen, festzustellen. Fünf Probestäbe werden 30 Tage lang in Petroleum gelegt und bei Zimmertemperatur auf Biegung beansprucht.

Andere chemische Einflüsse werden bei der elektrischen Prüfung untersucht.

16. Schlagbiegefestigkeit.

Ein spröder Stoff kann einer ruhigen Beanspruchung auf Biegung einen hohen Widerstand bieten, aber bei einer stoßweisen Beanspruchung geht er zu Bruch. Solchen Stößen sind Isolierstoffe vielfach ausgesetzt, teils betriebsmäßig, z. B. die Traversen von Hebelschaltern, teils durch Anstoßen oder Hinfallen, und gerade hierbei ließ die Widerstandsfähigkeit vielfach besonders zu wünschen übrig. Daher werden die Probestücke mit einem Normalpendelschlagwerk auf Schlagbiegefestigkeit geprüft. Die Anordnung ist von der Metallprüfung übernommen, jedoch erhalten die Isolierstoffproben keine Einkerbung.

Das Pendel (Abb. 12) besteht aus einem Schlagklotz, der vertikal mit einem starren Arm an einer horizontalen Achse aufgehängt ist. Der Probestab wird mit den beiden Enden gegen ein Widerlager im

[1]) ETZ. 1923, S. 577 u. 768. Da die Jahresversammlung 1923 nicht zustande kam, konnte die Abänderung noch nicht beschlossen werden.

[2]) Schob, Mitt. Materialpr.-Amt Berlin-Dahlem, 1922, S. 158. Berlin: Julius Springer.

Digitized by Google

Tiefpunkt des Pendels gelegt; das Pendel wird aus seiner Ruhelage gedreht, so daß der Massenmittelpunkt seiner Masse G kg um h_1 cm gegenüber seiner Ruhelage gehoben ist. Wird das Pendel losgelassen, so zertrümmert es den Probestab und schwingt noch ein Stück nach der anderen Seite hinaus, bis im Umkehrpunkt der Massenmittelpunkt die Höhe h_2 über der Ruhelage hat. War der Querschnitt der Probe

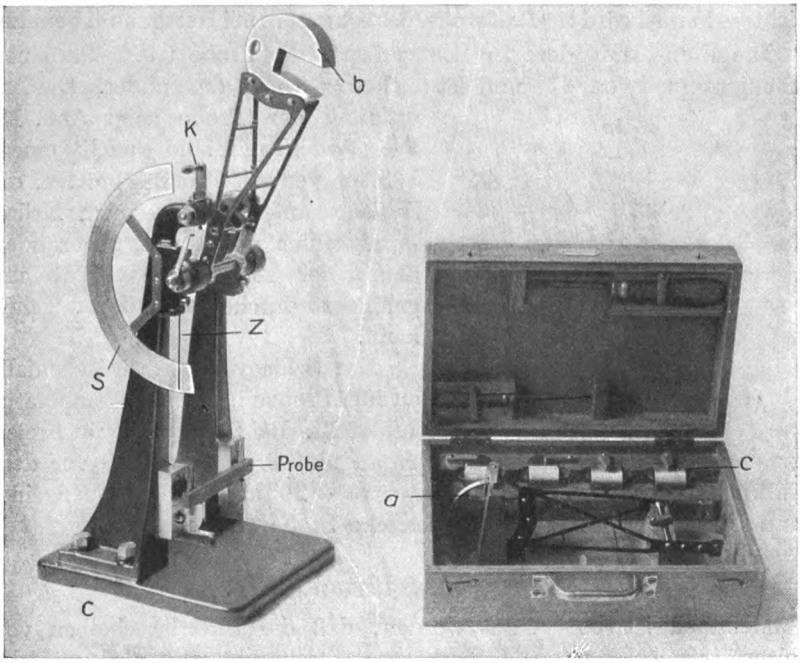


Abb. 12. Pendelschlagwerk zur Schlagbiegeprobe.

ab cm², so ist die zur Zertrümmerung der Probe auf die Querschnittseinheit aufgewendete Arbeit

$$A = G\frac{h_1 - h_2}{ab} \text{ cmkg/cm}^2.$$

Die Höhen h_1 und h_2 werden aus den Winkeln α_1 und α_2 berechnet, um welche das Pendel aus seiner Ruhelage gedreht war.

Bei dem Durchschlagen durch die Ruhelage nimmt das Pendel einen Zeiger mit, welcher bei der größten Ausschwingung stehen bleibt und auf einer Gradskala α_2 anzeigt. Wegen der kleinen in Reibung des Pendels und Schleppzeigers vernichteten Arbeit ist eine Korrektion anzubringen, die auch in der Skalenteilung berücksichtigt sein kann; praktisch benutzt man eine Eichkurve, welche für das ermittelte α_2 bei festgegebenem α_1 die Schlagarbeit abzulesen gestattet.

Digitized by Google

Zunächst war ein nach den festesten Isolierstoffen (Hartpapier) bemessenes Normalschlagpendel von 150 cm/kg Arbeitsinhalt vorgeschrieben, doch fielen bei Preßstoffen die Unterschiede von α_2 und α_1 nicht so groß aus, um die Genauigkeit zu geben, wie sie im Laufe der Entwicklung als wünschenswert erschien. Die Firma L. Schopper hat auf Anregung der Isolierstoffkommission ein Schlagwerk mit zwei auswechselbaren Pendeln für 10 bzw. 40 cm/kg Arbeitsinhalt gebaut, das leichtere Pendel wird für Preßstoffe, das schwerere bei Hartgummi benutzt.

Die Finne, mit der der Schlagkörper die Probe trifft, hat einen Schneidewinkel von 45° und ist nach $r = 3$ mm abgerundet. Die Anordnung der Probe zeigt Abb. 13. Die Widerlager sind nach einem Winkel von 15° hinterschnitten, die Auflagerkanten ϱ mit einem Krümmungsradius von 3 mm abgerundet, damit der zertrümmerte Stab ungehindert durch die Auflagen gehen kann.

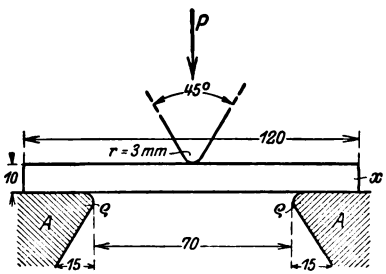


Abb. 13. Schlagbiegeprobe.

Der Schlagversuch wird ebenfalls an fünf Proben bei Zimmertemperatur angestellt. Bei Stoffen, die im Freien verwendet werden, außerdem noch an fünf Proben, welche vor dem Einbringen in das Schlagwerk auf etwa — 20° abgekühlt worden sind, denn bei großer Kälte werden manche Stoffe sehr spröde.

17. Die Kugeldruckhärte.

Mehrfach ist beobachtet worden, daß die Unterlagscheiben von Bolzen, mit welchen der Isolierkörper verschraubt war, sich mit der Zeit in den Isolierstoff eindrückten und die Befestigung sich lockerte. Um die Härte des Isolierstoffes zu prüfen, wird eine Kugel vom Durchmesser $D = 0{,}5$ cm mit einem konstanten Druck P von 50 kg in der Mitte der 1,5 cm breiten Fläche stoßfrei eingedrückt, die Eindrucktiefe h in cm wird nach 10 und 60 s gemessen, die zweite Messung geschieht, um eine etwaige Nachwirkung zu erfassen. Der Härtegrad H berechnet sich nach der Formel

$$H = \frac{P}{\pi h D} = \frac{100}{\pi h} \text{ kg/cm}^2.$$

Die Bestimmung wird an drei Proben bei 18—20° C ausgeführt.

18. Die Wärmebeständigkeit.

Im Betriebe ist ein Isolierstoff vielfach höheren Temperaturen ausgesetzt, teils infolge der Erwärmung von Leitern, welche auf ihm be-

Digitized by Google

festigt sind, durch den elektrischen Strom, teils durch die Hitze des Betriebsraumes, teils durch Sonnenbestrahlung.

Gerade hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegen höhere Temperaturen sind mit Isolierstoffen in der Praxis die traurigsten Erfahrungen gemacht.

Zur Prüfung der Wärmebeständigkeit dient die Martensprobe mit einem Normalapparat, den Abb. 14 darstellt. Der Probestab *g* wird mit

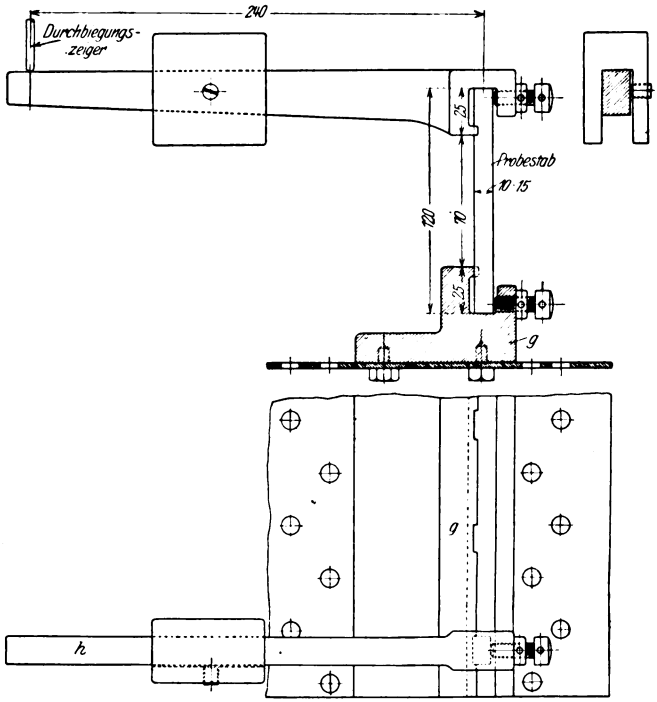


Abb. 14. Martensapparat zur Prüfung der Wärmebeständigkeit.

seinem unteren Ende senkrecht in den Block *g* eingesetzt, daß die 1,5 cm breiten Flächen gegen die Widerlager sich stützen und mit dem am oberen Ende angehängten Gewichthebel *h* auf Biegung beansprucht. Die Biegespannung ist konstant 50 kg/cm². Drei solcherart beanspruchte Proben werden in einen Heizkasten gesetzt, dessen Temperatur mit einer Geschwindigkeit von etwa 50° in der Stunde gesteigert wird. Bei dieser Geschwindigkeit bleibt die Temperatur in den Probestäben, die ja schlechte Wärmeleiter sind, nur um praktisch zu vernachlässigende Beträge (5° C) hinter der Lufttemperatur des Heizraumes zurück. An Markierstäbchen, die auf die Hebel *h* bei der Hebellänge 120 mm aufgesetzt sind und aus dem Kasten herausragen, wird beobachtet, bei welchem Wärmegrad *A g* eine Senkung um 3 mm oder ein Bruch der Probe eintritt.

Digitized by Google

Bei manchen Isolierstoffen nimmt die Biegefestigkeit zuerst mit der Temperatur ab, steigt dann bei weiterer Temperaturerhöhung wieder etwas.

Bei der Prüfung mit dem Martensapparat mit allmählich steigender Temperatur, wie sie ja den praktischen Verhältnissen entspricht, wird diese Eigenschaft am ehesten erfaßt. Andererseits ist nicht zu verkennen, daß die Anwendung der konstanten Biegespannung von 50 kg/cm² ohne Rücksicht auf die hohe oder geringe Biegefestigkeit des Isolierstoffes bei Zimmertemperatur den Einfluß der Wärme nicht rein erkennen läßt.

Es ist angeregt worden, an Stelle der konstanten Biegespannung von 50 kg/cm² die Hälfte der Bruchbiegespannung bei Zimmertemperatur zu wählen und außerdem an Stelle der Martensprobe die Anordnung wie bei der Bestimmung der Biegefestigkeit zu nehmen. Im Materialprüfungsamt sind von Herrn Schob[1]) an sieben verschiedenen Preßstoffen vergleichende Versuche in dieser Richtung vorgenommen. Die Martensprobe, mit der halben, bei Zimmertemperatur im Biegeapparat ermittelten Bruchbiegespannung, ergab erhebliche niedere Wärmegrade Ag als die mit 50 kg/cm²; im Biegeapparat mit der halben Bruchbiegespannung ergaben sich Grenztemperaturen, die im großen und ganzen sich nicht weit von denen der mit der Martensprobe bei 50 kg/cm² ermittelten entfernten. Zu einer Änderung der Prüfvorschriften hat man sich daher noch nicht entschlossen.

Nach meiner Ansicht wäre dem Konstrukteur, der es ja in der Hand hat, bei dem zu bauenden Apparat eine geringere Biegefestigkeit des Isolierstoffes durch die Wahl größerer Abmessungen auszugleichen, am meisten damit gedient, zu wissen, welche Biegefestigkeit der Isolierstoff noch bei der praktisch in Frage kommenden höheren Temperatur besitzt. Naturgemäß würde es viele Probestäbe und Arbeit kosten, wenn die Bestimmung für eine Reihe von Temperaturen ausgeführt werden sollte; man müßte sich auf wenige praktisch hauptsächlich in Frage kommende Temperaturen beschränken. Nach den Errichtungvorschriften des V. D. E. (§ 26) ist „wärmesicher" ein Gegenstand, der bei der höchsten betriebsmäßig vorkommenden Temperatur keine den Gebrauch beeinträchtigende Veränderung erleidet. Leider ist es nicht möglich gewesen, eine Einigung der Hersteller, Konstrukteure und Verbraucher auf bestimmte Temperaturgrenzen für die wichtigsten Verwendungszwecke zu einigen. Die aus der Bedenklichkeit, gleich das absolut Richtige zu treffen, erfolgte Unterlassung, auch nur eine Mindestgrenze der Temperatur festzusetzen, welche alle Isolierstoffe aushalten müssen, hat sich bitter gerächt. In der Kriegs- und Nachkriegszeit sind in Massen Pechstoffe für Installationsmaterial in Anwendung gekommen,

[1]) ETZ, 1922, S. 1086.

Digitized by Google

welche bereits bei der Lagerung in sonnebestrahlten Schuppen die Form verloren. Neuerdings wird bei der Systemprüfung von Installationsmaterial — zur Erlangung der Berechtigung, das

Prüfzeichen anzubringen — verlangt, daß die Träger spannungführender Teile eine Temperatur von 100° C aushalten, Schalterkappen 70° C.

19. Die Feuersicherheit.

Nach den Errichtungsvorschriften ist feuersicher ein Gegenstand, der entweder nicht entzündet werden kann oder nach Entzündung nicht von selbst weiterbrennt.

Der horizontal eingespannte Normalstab wird in der aus Abb. 15 hervorgehenden Weise der Flamme eines mit Leuchtgas gespeisten Bunsenbrenners 1 Minute lang ausgesetzt. Die Brenneröffnung soll 9 mm, die Flammenhöhe bei senkrecht gestelltem Brenner 10 cm betragen. Die Neigung des Brenners unter 45° ist gewählt, damit etwa aus dem Isolierstoff abtropfende Masse nicht die Brenneröffnung verstopft.

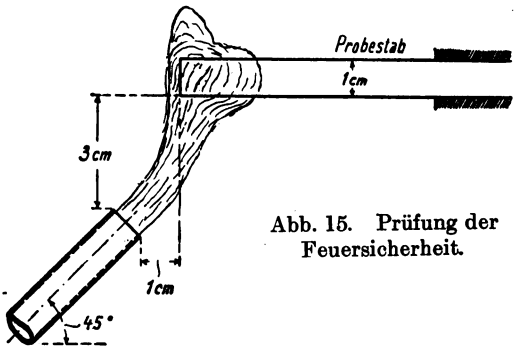


Abb. 15. Prüfung der Feuersicherheit.

Die Probe wird nach folgenden drei Stufen beurteilt:

0. Der Stab brennt nach dem Entfernen der Flamme länger als 1/4 Minute weiter.

1. Der Stab brennt nach dem Entfernen der Flamme nicht länger als 1/4 Minute weiter.

2. Der Stab entzündet sich nicht in der Flamme.

Der Versuch wird an drei Probestäben vorgenommen.

20. Die Größe des Probestabes.

Zu den geschilderten Versuchen sind 25 (neuerdings 30) Normalstäbe erforderlich. Die Abmessungen 12 × 1,5 × 1 cm des Normalstabes wurden seinerzeit gewählt, weil einige Isolierstoffe sich schlecht in geringerer Dicke als 1 cm herstellen lassen. Andererseits bieten kleinere Probestäbe, z. B. 5 × 10 × 60 mm, gewisse Vorteile; zunächst ist der Materialverbrauch geringer, vor allem aber könnte man kleinere Stäbe auch aus Fertigteilen herausschneiden. Hiergegen ist eingewendet worden, daß solche bearbeiteten Proben sich ungünstiger verhielten

Digitized by Google

als die mit der Preßhaut versehenen Stücke. Aus der Untersuchung bearbeiteter und unbearbeiteter Probestäbe normaler Größe aus verschiedenen Isolierstoffen, die im Materialprüfungsamt von Schob[1]) durchgeführt wurde, ist jedoch ein solcher Einfluß der Preßhaut auf die Festigkeit generell und in wesentlicher Größe nicht zu erkennen. Andererseits haben die Parallelversuche der Festigkeitsprüfungen mit großen und kleinen Normalstäben noch nicht zu einem abschließenden Ergebnis geführt. Bei dem Normalschlagpendel von Schopper ist auch ein Widerlager für die kleinere Probenform vorgesehen.

21. Die Feuchtigkeitssicherheit.

Wie schon mehrfach im vorhergehenden hervorgehoben worden ist, sind fast alle für Isolierzwecke in Frage kommenden Stoffe in völlig trockenem Zustande für niedere Spannungen praktisch genügend nichtleitend, so daß sich eine Messung des Isoliervermögens erübrigte, manche aber werden durch Aufnahme von Feuchtigkeit elektrolytisch leitend und für die Starkstromtechnik unbrauchbar. Der Feuchtigkeitseinfluß ist am frühesten und stärksten an der Oberfläche bemerkbar, daher ist die Messung des Oberflächenwiderstandes mit dem in Abschnitt 3 beschriebenen Normalapparat zur Bestimmung der Feuchtigkeitssicherheit vorgeschrieben. Die Gleichspannung beträgt 1000 V. Die Probenform ist eine Platte von $15 \times 12 \times 1$ cm, zur Not können die Messungen auch auf den Normalstäben von $12 \times 1{,}5 \times 1$ cm ausgeführt werden. Die Platten werden an der Oberfläche abgeschliffen, damit nicht ein etwaiger Lacküberzug, der im Betriebe doch keinen zuverlässigen Schutz bieten würde, die wirklichen Eigenschaften des Isolierstoffes verdeckt.

Der Oberflächenwiderstand einer Fläche von 10 cm Breite und 1 cm Länge wird zunächst an den abgeschliffenen sonst im Zustande der Einsendung befindlichen Platten gemessen. Die Platten werden dann 24 Stunden gewässert, mit einem trockenen Tuch abgerieben und senkrecht bei Zimmertemperatur in nicht bewegter Luft 2 Stunden stehen gelassen, um die äußerlich anhaftende Feuchtigkeit zu entfernen, und nochmals auf Oberflächenwiderstand gemessen, wobei der Galvanometerausschlag 1 Minute nach Anlegen der Spannung abgelesen wird. Zu jeder Versuchsreihe werden drei Platten verwendet, an jeder Platte mindestens zwei Messungen vorgenommen. Die Ergebnisse der Messung werden nicht in Megohm (Million Ohm) angegeben (da es sich bei dem Oberflächenwiderstande nicht um genaue Werte, sondern um Größenordnungen handelt), sondern in Vergleichszahlen, die folgendermaßen abgestuft sind:

[1]) ETZ. 1922, S. 1086.

Digitized by Google

Oberflächenwiderstand	Vergleichszahl
unter $^1/_{100}$ $M\Omega$	0
$^1/_{100}$ bis 1 $M\Omega$	1
1 bis 100 $M\Omega$	2
100 bis 10000 $M\Omega$	3
10000 bis 1 Mill. $M\Omega$	4
über 1 Mill. $M\Omega$	5

Nach den Errichtungsvorschriften § 2 b) ist feuchtigkeitssicher ein Gegenstand, der sich im Gebrauch durch Feuchtigkeitsaufnahme nicht so verändert, daß er für die Benutzung ungeeignet wird. Welche Vergleichszahl des Oberflächenwiderstandes nach dem Wässern ein Isolierstoff, der als Träger spannungsführender Teile verwendet wird, mindestens haben soll, ist noch nicht festgelegt. M. E. würde die Vergleichszahl 2 zu verlangen sein.

Neben der elektrischen Messung wird noch die Gewichtsänderung durch das Wässern in Prozent festgestellt, doch gibt die Wägung nicht annähernd so zuverlässigen Aufschluß über die hygroskopische Eigenschaft, wie der Oberflächenwiderstand.

22. Der chemische Angriff.

An chemischen Einflüssen sind Isolierstoffe, abgesehen von der Einwirkung von Ölen, die bei der Biegefestigkeit behandelt ist, besonders Ammoniakdämpfen in Viehställen und Nebeln verdünnter Schwefelsäure aus Akkumulatorenräumen ausgesetzt. Auch der Angriff durch diese Chemikalien ist, schärfer als mit chemischen Methoden, durch die Messung des Oberflächenwiderstandes zu erfassen, da er, wenn überhaupt vorhanden, die Oberfläche leitend macht.

Die für die Bestimmung der Feuchtigkeitssicherheit verwandten Platten werden 3 Wochen in 25prozentige Schwefelsäure gelegt, danach eine Minute in fließendem Wasser abgespült und, wie nach der Wässerung beschrieben, weiter behandelt.

Drei andere Platten werden in einem großen abgedeckten Glasgefäße aufgehängt, auf dessen Boden sich eine gesättigte wässerige Ammoniaklösung befindet. Von 3 zu 3 Tagen wird etwas Ammoniak zugefüllt, um die Verluste an Ammoniakdampf zu decken. Nach 3 Wochen werden die Platten herausgenommen, mit einem trockenen Tuch abgerieben und gemessen.

Außerdem wird natürlich bei beiden Versuchen festgestellt, ob eine Veränderung sichtbar ist und die Gewichtsänderung bestimmt.

23. Der Widerstand im Innern.

Bei Preßstoffen, die mit Kunstharzen, wie Bakelit, hergestellt sind, kann es vorkommen, daß sie an der Oberfläche hervorragend isolieren,

Digitized by Google

zwischen Leiterstücken, die mit Schrauben auf den Preßstücken befestigt wurden, aber ein erheblicher Stromübergang durch das Innere des Isolierstoffes beobachtet wird. Es ist der Wärmeprozeß, welcher das Kunstharz in die letzte beständigste Modifikation überführen soll (vgl. die Ausführungen von Bültemann über Bakelit S. 193ff.), nicht ausreichend durchgeführt worden und es hat sich nachträglich im Innern Wasser abgespalten.

Um etwaige Mängel dieser Art aufzudecken, werden zwei Löcher von 5 mm Durchmesser und 15 mm Mittenabstand in die Platte etwa $^2/_3$ Plattendicke tief gebohrt und mit Quecksilber gefüllt. Der Widerstand zwischen diesen beiden Quecksilberelektroden wird bei 1000 V. Gleichspannung gemessen; ist derselbe kleiner als der Oberflächenwiderstand im Zustande der Einsendung, so wird die Platte bis in tiefere Schichten abgedreht und unmittelbar nach dem Abdrehen auf ihren Oberflächenwiderstand gemessen.

24. Die Lichtbogensicherheit.

Schließlich kann die Isolierfähigkeit eines Isolierstoffes noch dadurch vernichtet werden, daß er von einem elektrischen Lichtbogen getroffen wird.

Zur Prüfung in dieser Hinsicht werden auf die wagerechte Platte zwei angespitzte Reinkohlen von 8 mm Durchmesser — in einem Winkel von etwas mehr als einem Rechten gegeneinander — gesetzt, etwa um 60° gegen die Wagerechte geneigt. An die Kohlen wird über einem Vorwiderstand von 20 Ω eine Spannung von 220 V. gelegt und der Lichtbogen zwischen den Kohlenspitzen gezündet. Diese werden mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 mm in der Sekunde auseinandergezogen. Das Verhalten wird nach folgenden vier Stufen der Lichtbogensicherheit bewertet.

0. Unter dem über 20 mm lang ausziehbaren Lichtbogen bildet sich eine leitende Brücke im Isolierstoff, die auch nach dem Erkalten leitend bleibt (d. h. nach dem Abschalten der Spannung und Erkalten wird bei Wiedereinschalten der Spannung die Brücke zwischen den auseinandergezogen gebliebenen Kohlen wieder glühend).

1. Unter dem über 20 mm lang ausziehbaren Lichtbogen bildet sich eine leitende Brücke im Isolierstoff, die aber nach dem Erkalten ihre Leitfähigkeit verliert.

2. Der Lichtbogen läßt sich mehr als 20 mm ausziehen, es bildet sich aber keine zusammenhängende leitende Brücke im Isolierstoff. (Dies tritt dann ein, wenn aus der sonst unverbrennlichen Platte brennbare Bestandteile vergasen, welche die Lichtbogenflamme nähren.)

3. Der Lichtbogen läßt sich nicht über seine normale Länge von etwa 20 mm ausziehen.

Digitized by Google

25. Die Bearbeitbarkeit.

Für diese sind Vorschriften nicht aufgestellt; bei einem großen Teile der Isolierstoffe wird die vollständige Formgebung beim Pressen beendet, eine Bearbeitung findet nicht statt. Schwierig ist es, die Bearbeitbarkeit in absoluten Zahlen messend zu erfassen und zu beschreiben. Vergleichende Beobachtungen über die Bearbeitbarkeit kann man anstellen indem man das Abstumpfen der Werkzeuge beim Sägen, Hobeln, Drehen, Bohren verfolgt, das Ausbrechen der Kanten[1]) u. dgl. Vielfach wird auch die Kraft bestimmt, welche nötig ist, um eine Metallschraube aus einem in den Isolierstoff geschnittenen Gewinde herauszureißen.

26. Prüfung von Fertigteilen.

Da zum großen Teil der Isolierstoff fertig in der Gebrauchsform gepreßt dem Konstrukteur geliefert wird, ist es meist nicht möglich, die beschriebenen Festigkeits-, Wärme- und elektrischen Prüfungen an Stichproben auszuführen. Der Konstrukteur hat aber ein lebhaftes Interesse daran, festzustellen, ob die Lieferung die verlangten Eigenschaften hat. Neben den Vorschriften für die Materialprüfung in Normalformen ist daher die Festlegung von Methoden zur Prüfung von Fertigteilen notwendig. Diese recht schwierige Aufgabe ist ebenfalls von der Isolierstoffkommission in Angriff genommen, leider mußten die in der bayerischen Landesgewerbeanstalt Nürnberg im Auftrage der Kommission begonnenen Versuche an Isolierteilen für Hebelschalter nach Ausbildung eines Prüfeapparates hierzu infolge der Not der Zeit abgebrochen worden.

Beachtenswerte Versuche der Abnahmeprüfung von Fertigteilen sind von Dr. Georg Meyer bei der Firma Dr. Paul Meyer unternommen; er prüft die Festigkeit[2]) von Isolierteilen — auch bei höheren Temperaturen — durch den Druck eines flachen Stengels von 9 mm Durchmesser mit 1000 kg/cm² und bestimmt die Eindrucktiefe. Zur Feststellung der Feuchtigkeitssicherheit werden auf den Isolierteil nach 24stündigem Wässern zwei Spitzen in 5 mm Abstand aufgesetzt, an die eine Wechselspannung von 4000 V. 15 Sekunden lang gelegt wird; hat der Isolierteil Feuchtigkeit aufgenommen, so wird eine leitende Ader eingebrannt[3]).

27. Isolierstoffe für Hochspannung.

Den behandelten Prüfvorschriften des V. D. E. haben natürlich auch Isolierstoffe für Hochspannung zu genügen, darüber hinaus ist das Verhalten gegen hohe Spannungen zu untersuchen. Unterausschüsse des V. D. E. sind damit beschäftigt, Prüfvorschriften für keramische Stoffe

[1]) ETZ. 1912, S. 450. — [2]) ETZ. 1922, S. 1285. — [3]) ETZ. 1923, S. 880.

Digitized by Google

und geschichtete Stoffe auszuarbeiten; neben der Durchschlagprobe wird für diese Zwecke die Messung der dielektrischen Verluste von Bedeutung sein, worüber in Abschnitt 8 dieses Aufsatzes bereits gesprochen wurde.

28. Die Prüfung von Marmor und Schiefer.

Diese Natursteine sind sämtlich hygroskopisch, aber doch je nach ihrer Herkunft graduell verschieden, die Messung des Oberflächenwiderstandes nach 24stündigem Wässern oder aber nach mehrtägigem Stehen in einem feuchten Raum von 80% relativer Feuchtigkeit, die man in einem geschlossenen Behälter über einer Schale mit verdünnter Schwefelsäure von der spezifischen Dichte 1,19 bei 20° erhält, ist angebracht.

Das Vorkommen metallischer Adern, welche diese Gesteine für Isolierzwecke unbrauchbar macht, ist leider meist nur durch Abtasten mit spannungführenden Spitzen nach Zerschlagen der Probe möglich. Versuche, große Tafeln vor dem Bearbeiten mit der Selbstinduktion einer Spule bei Wechselstrom von Telephonfrequenz auf leitende Adern zu prüfen, haben nicht zum Ziele geführt. Die eisenhaltigen Adern bestehen meist aus Hornblende, einer nicht magnetischen Modifikation, der Wirbelstromverlust in den Adern ist bei dieser Frequenz zu gering, um in einer Veränderung des Scheinwiderstandes der Spule sich bemerkbar zu machen. Vielleicht käme man mit Anordnungen der drahtlosen Telegraphie besser zum Ziel.

Bei Schiefer ist eine Prüfung auf das Verhalten bei höherer Temperatur notwendig; bei manchen Sorten werden Schichten beim Erwärmen abgesprengt.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.

Digitized by Google

Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. Herausgegeben von **Walter Demuth,** Oberingenieur, Vorstand des Mechan.-Techn. Laboratoriums der Porzellanfabrik Hermsdorf i. Th., unter Mitarbeit der Oberingenieure **Hermann Franz** und **Kurt Bergk.** Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 132 Abbildungen im Text. 1923.
Gebunden 12 Goldmark / Gebunden 3 Dollar

Die Porzellan-Isolatoren. Von Professor Dr. **Gustav Benischke.** Zweite, erweiterte Auflage. Mit 162 Abbildungen im Text. 1923.
4.80 Goldmark; gebunden 5.60 Goldmark / 1.15 Dollar; gebunden 1.35 Dollar

---

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik. Von Professor Dr. **Gustav Benischke.** Sechste, vermehrte Auflage. Mit 633 Abbildungen im Text. 1922. Gebunden 15 Goldmark / Gebunden 3.50 Dollar

---

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Dr. **Adolf Thomälen,** a. o. Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Neunte, verbesserte Auflage. Mit 555 Textbildern. 1922.
Gebunden 9 Goldmark / Gebunden 2.15 Dollar

Elektrische Starkstromanlagen. Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Studienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack** in Magdeburg. Sechste, durchgesehene und ergänzte Auflage. Mit 296 Textfiguren. 1923.
5 Goldmark; gebunden 6 Goldmark / 1.20 Dollar; gebunden 1.45 Dollar

---

Schaltungen von Gleich- und Wechselstromanlagen. Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren, Lichtanlagen, Kraftwerke und Umformerstationen. Ein Lehr- und Hilfsbuch. Von Studienrat Dipl.-Ing. **Emil Kosack** in Magdeburg. Mit 226 Textabbildungen. 1922.
4 Goldmark / 1 Dollar

Grundzüge der Starkstromtechnik. Für Unterricht und Praxis. Von Dr.-Ing. **K. Hoerner.** Mit 319 Textabbildungen und zahlreichen Beispielen. 1923. 4 Goldmark; gebunden 5 Goldmark / 1 Dollar; gebunden 1.25 Dollar

---

Elektrische Schaltvorgänge und verwandte Störungserscheinungen in Starkstromanlagen. Von Professor Dr.-Ing. und Dr.-Ing. e. h. **Reinhold Rüdenberg,** Chefelektriker, Privatdozent in Berlin. Mit 477 Abbildungen im Text und 1 Tafel. 1923.
Gebunden 16 Goldmark / Gebunden 3.80 Dollar

Anlaß- und Regelwiderstände. Grundlagen und Anleitung zur Berechnung von elektrischen Widerständen. Von **Erich Jasse.** Zweite, verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 69 Textabbildungen. 1924.
6 Goldmark; gebunden 6.80 Goldmark / 1.45 Dollar; gebunden 1.65 Dollar

Digitized by Google

Verlag von Julius Springer in Berlin W 9

Die Elektrotechnik und die elektromotorischen Antriebe. Ein elementares Lehrbuch für technische Lehranstalten und zum Selbstunterricht. Von Dipl.-Ing. **Wilhelm Lehmann.** Mit 520 Textabbildungen und 116 Beispielen. 1922. Gebunden 9 Goldmark / Gebunden 2.15 Dollar

---

Die Elektromotoren in ihrer Wirkungsweise und Anwendung. Ein Hilfsbuch für die Auswahl und Durchbildung elektromotorischer Antriebe. Von **Karl Meller,** Oberingenieur. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 153 Textabbildungen. 1923.
3.60 Goldmark; gebunden 4.40 Goldmark / 0.90 Dollar; gebunden 1.10 Dollar

---

Elektromotoren. Ein Leitfaden zum Gebrauch für Studierende, Betriebsleiter und Elektromonteure. Von Dr.-Ing. **Johann Grabscheid.** Mit 72 Textabbildungen. 1921. 2.80 Goldmark / 0.70 Dollar

---

Der Drehstrommotor. Ein Handbuch für Studium und Praxis. Von Professor **Julius Heubach,** Direktor der Elektromotorenwerke Heidenau, G. m. b. H. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 222 Abbildungen. 1923.
Gebunden 14.50 Goldmark / Gebunden 3.50 Dollar

Die asynchronen Drehstrommotoren und ihre Verwendungsmöglichkeiten. Von **Jakob Ippen,** Betriebsingenieur. Mit 67 Textabbildungen. Erscheint im März 1924.

Elektrische Hochspannungszündapparate. Theoretische und experimentelle Untersuchungen. Von **Viktor Kulebakin,** Professor, Dipl.-Ing., Moskau. Mit 100 Textabbildungen. 1924. 4.20 Goldmark / 1 Dollar

---

Ankerwicklungen für Gleich- und Wechselstrommaschinen. Ein Lehrbuch. Von Professor **Rudolf Richter** in Karlsruhe. Mit 377 Textabbildungen. Berichtigter Neudruck. 1922.
Gebunden 11 Goldmark / Gebunden 2.80 Dollar

Anleitungen zum Arbeiten im Elektrotechnischen Laboratorium. Von **E. Orlich.** Erster Teil. Mit 74 Textbildern. 1923.
2 Goldmark / 0.50 Dollar

Digitized by Google

Arnold-la Cour, Die Wechselstromtechnik. Herausgegeben von Professor Dr.-Ing. **E. Arnold**, Karlsruhe. In fünf Bänden. Unveränderter Neudruck. 1923.

I. Band: **Theorie der Wechselströme.** Von **J. L. la Cour** und **O. S. Bragstad.** Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 591 in den Text gedruckten Figuren.
Gebunden 24 Goldmark / Gebunden 6 Dollar

II. Band: **Die Transformatoren.** Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour.** Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 443 in den Text gedruckten Figuren und 6 Tafeln.
Gebunden 16 Goldmark / Gebunden 4 Dollar

III. Band: **Die Wicklungen der Wechselstrommaschinen.** Von **E. Arnold.** Zweite, vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 463 Textfiguren und 5 Tafeln.
Gebunden 12 Goldmark / Gebunden 3 Dollar

IV. Band: **Die synchronen Wechselstrommaschinen.** Generatoren, Motoren und Umformer. Ihre Theorie, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour.** Zweite, vollständig umgearbeitete Aufl. Mit 530 Textfiguren und 18 Tafeln. Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 5 Dollar

V. Band: **Die asynchronen Wechselstrommaschinen.**
1. Teil: **Die Induktionsmaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von **E. Arnold** und **J. L. la Cour** unter Mitarbeit von **A. Fraenckel.** Mit 307 in den Text gedruckten Figuren und 10 Tafeln.
Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.50 Dollar

2. Teil: **Die Wechselstromkommutatormaschinen.** Ihre Theorie, Berechnung, Konstruktion und Arbeitsweise. Von **E. Arnold, J. L. la Cour** und **A. Fraenckel.** Mit 400 in den Text gedruckten Figuren, VIII Tafeln.
Gebunden 20 Goldmark / Gebunden 5 Dollar

Arnold-la Cour, Die Gleichstrommaschine. Ihre Theorie, Untersuchung, Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise. Dritte, vollständig umgearbeitete Auflage. Herausgegeben von **J. L. la Cour.** In 2 Bänden.

I. Band: **Theorie und Untersuchung.** Mit 570 Textfiguren. Unveränderter Neudruck. 1923.
Gebunden 18 Goldmark / Gebunden 4.50 Dollar

II. Band: **Konstruktion, Berechnung und Arbeitsweise.**
In Vorbereitung.

Digitized by Google

Elektrotechnische Meßkunde. Von Dr.-Ing. **P. B. Arthur Linker.** Dritte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 408 Textfiguren. Unveränderter Neudruck. 1923.
Gebunden 11 Goldmark / Gebunden 2.70 Dollar

Elektrotechnische Meßinstrumente. Ein Leitfaden. Von **Konrad Gruhn,** Oberingenieur und Gewerbestudienrat. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 321 Textabbildungen. 1923.
Gebunden 7 Goldmark / Gebunden 1.70 Dollar

Die elektrische Kraftübertragung. Von Dipl.-Ing. **Herbert Kyser,** Oberingenieur. In 3 Bänden.

Erster Band: **Die Motoren, Umformer und Transformatoren.** Ihre Arbeitsweise, Schaltung, Anwendung und Ausführung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 305 Textfiguren und 6 Tafeln. Unveränderter Neudruck. 1923. Gebunden 12.60 Goldmark / Gebunden 3 Dollar

Zweiter Band: **Die Niederspannungs- und Hochspannungs-Leitungsanlagen.** Ihre Projektierung, Berechnung, elektrische und mechanische Ausführung und Untersuchung. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 319 Textfiguren und 44 Tabellen. Unveränderter Neudruck. 1923.
Gebunden 12.60 Goldmark / Gebunden 3 Dollar

Dritter Band: **Die maschinellen und elektrischen Einrichtungen des Kraftwerkes und die wirtschaftlichen Gesichtspunkte für die Projektierung.** Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 665 Textfiguren, 2 Tafeln und 87 Tabellen. 1923.
Gebunden 22.70 Goldmark / Gebunden 5.40 Dollar

Telephon- und Signal-Anlagen. Ein praktischer Leitfaden für die Errichtung elektrischer Fernmelde(Schwachstrom-)Anlagen. Herausgegeben von **Carl Beckmann,** Oberingenieur der Aktien-Gesellschaft Mix & Genest, Telephon- und Telegraphenwerke, Berlin-Schöneberg. Bearbeitet nach den Leitsätzen für die Errichtung elektrischer Fernmelde-(Schwachstrom-)Anlagen der Kommission des Verbandes deutscher Elektrotechniker und des Verbandes elektrotechnischer Installationsfirmen in Deutschland. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 418 Abbildungen und Schaltungen und einer Zusammenstellung der gesetzlichen Bestimmungen für Fernmeldeanlagen. 1923.
Gebunden 7.50 Goldmark / Gebunden 1.80 Dollar

Die Nebenstellentechnik. Von **Hans B. Willers,** Oberingenieur und Prokurist der Aktiengesellschaft Mix & Genest, Berlin-Schöneberg. Mit 137 Textabbildungen. 1920. Gebunden 6 Goldmark / Gebunden 1.50 Dollar

---

Hochfrequenzmeßtechnik. Ihre wissenschaftlichen und praktischen Grundlagen. Von Dr.-Ing. **August Hund,** beratender Ingenieur. Mit 150 Textabbildungen. 1922. Gebunden 11 Goldmark / Gebunden 2.75 Dollar

---

Der Radio-Amateur „Broadcasting". Ein Lehr- und Hilfsbuch für die Radio-Amateure aller Länder. Von Dr. **Eugen Nesper.** Vierte Auflage. Mit 377 Abbildungen. 1924.
Gebunden 10 Goldmark / Gebunden 2.75 Dollar

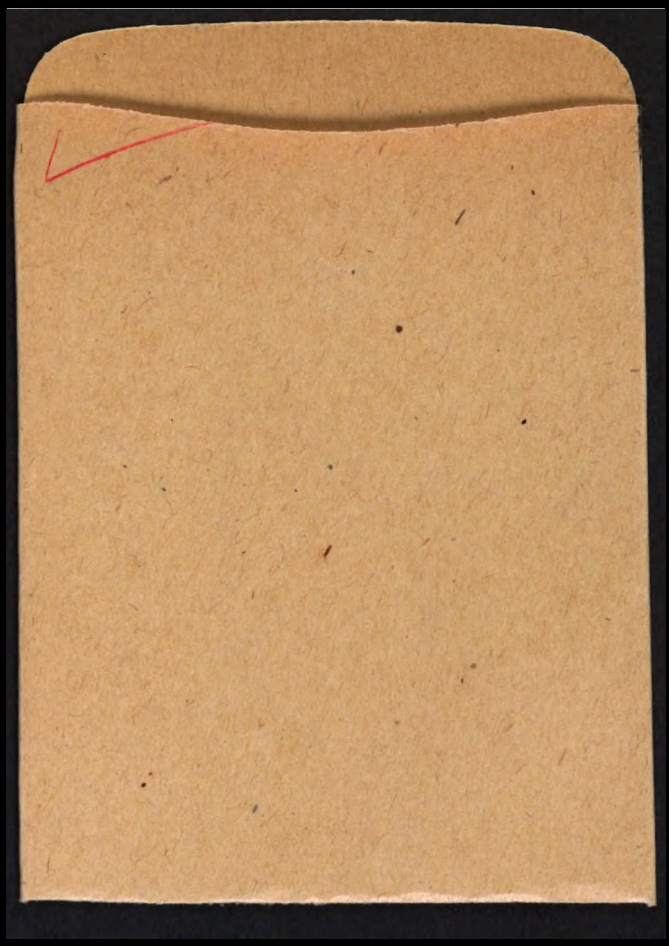
Digitized by Google

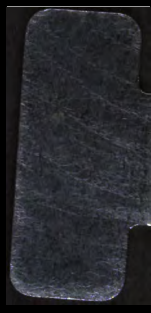
Digitized by Google

89088934005

b89088934005a

Digitized by Google





G. E. Stechert & Co.
Alfred Hafner
New York

Digitized by Google

89088934005

B89088934005A

Digitized by Google